

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**Universidad  
Carlos III de Madrid**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DISEÑO DE UNA TERMINAL DE AUTOBUSES Y  
DE SU RED PRÓXIMA CON OPTIMIZACIÓN  
HEURÍSTICA DE LAS RUTAS**

**AUTOR:**

**D. Fabio Gámir Moreno**

**TUTORA DEL PROYECTO:**

**DRA. DÑA. M<sup>a</sup> JESÚS LÓPEZ BOADA**

**Junio, 2016**

## INDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>OBJETIVO DEL PROYECTO Y JUSTIFICACION DE LA LOCALIDAD ESCOGIDA .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE AUTOBUSES.....</b>	<b>13</b>
2.1	EMPLAZAMIENTO ACTUAL Y ACCESO .....	14
2.2	ZONA COMERCIAL .....	15
2.3	ZONA DÁRSENAS.....	15
2.4	TRANSPORTE FERROVIARIO .....	15
<b>3</b>	<b>ESTUDIO DE DEMANDA.....</b>	<b>16</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	17
3.2	DEMANDA.....	17
3.2.1	<i>Bases para el estudio.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Cálculo de la demanda .....</i>	<i>18</i>
3.2.2.1	Demanda tendencial.....	18
3.2.2.2	Demanda inducida .....	22
3.2.2.3	Demanda generada.....	22
3.2.2.4	Demanda en hora punta del día más desfavorable del año.....	23
<b>4</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO DE LA TERMINAL .....</b>	<b>25</b>
4.1	ESTUDIO DE LA PARCELA .....	27
4.2	CÁLCULO DE NÚMERO DE DÁRSENAS .....	27
4.3	ÁREAS Y SERVICIOS DISTINGUIBLES DENTRO DE LA TERMINAL.....	29
4.3.1	<i>Organización general .....</i>	<i>29</i>
4.3.2	<i>Zona Dársenas.....</i>	<i>29</i>
4.3.2.1	Área de dársenas .....	31
4.3.2.2	Zona Peatonal .....	34
4.3.2.3	Zona de rodadura .....	34
4.3.3	<i>Aparcamiento.....</i>	<i>35</i>
4.3.3.1	Aparcamiento vehículos motorizados.....	35
4.3.3.2	Aparcamiento bicicletas.....	38
4.3.3.3	Jardines.....	38
4.3.3.4	Cabina de control.....	38
4.3.4	<i>Atención al usuario.....</i>	<i>39</i>
4.3.4.1	Vestíbulo general estación.....	39
4.3.4.2	Taquillas venta de tickets.....	41
4.3.4.3	Tiendas.....	41
4.3.4.4	Consigna.....	41
4.3.4.5	Aseos femeninos.....	42
4.3.4.6	Aseos masculinos .....	43
4.3.5	<i>Cafetería restaurante .....</i>	<i>43</i>
4.3.5.1	Vestíbulo cafetería .....	43
4.3.5.2	Cafetería .....	43
4.3.5.3	Comedor .....	44
4.3.5.4	Cocina .....	44
4.3.5.5	Almacén cafetería .....	45
4.3.5.6	Cuarto de limpieza .....	45
4.3.5.7	Aseo femenino.....	45
4.3.5.8	Aseo masculino .....	45
4.3.6	<i>Oficinas.....</i>	<i>45</i>
4.3.6.1	Oficina 1.....	46
4.3.6.2	Oficina 2.....	46

4.3.6.3	Sala reuniones.....	46
4.3.6.4	Despacho Jefe Estación.....	47
4.3.6.5	Sala control .....	47
4.3.6.6	Oficina Diputación de Burgos.....	47
4.3.6.7	Sala conductores.....	47
4.3.6.8	Aseos masculinos.....	48
4.3.6.9	Aseos femeninos.....	48
4.3.6.10	Cuarto limpieza.....	48
<b>5</b>	<b>DESCRIPCIÓN Y DIMENSIONES DEL DISEÑO DEFINITIVO .....</b>	<b>49</b>
5.1	MURO PERIMETRAL.....	50
5.2	ÁREAS Y SERVICIOS DISTINGUIBLES EN LA TERMINAL .....	51
5.2.1	<i>Pavimento circulación autobuses</i> .....	51
5.2.2	<i>Zona Dársenas</i> .....	51
5.2.3	<i>Aparcamiento</i> .....	52
5.2.3.1	Jardines y área acceso.....	52
5.2.3.2	Cabina de control.....	52
5.2.4	<i>Edificio terminal</i> .....	53
5.2.4.1	Solera .....	53
5.2.4.2	Estructura .....	53
5.2.4.3	Fachada.....	53
5.2.4.4	Cubierta .....	54
5.2.4.5	Accesos .....	55
5.2.4.6	Taquillas venta de tickets.....	55
5.2.4.7	Tiendas.....	55
5.2.4.8	Consigna.....	56
5.2.4.9	Aseos femeninos.....	56
5.2.4.10	Aseos masculinos .....	57
5.2.4.11	Cuarto limpieza .....	57
5.2.5	<i>Cafetería restaurante</i> .....	57
5.2.5.1	Cafetería .....	58
5.2.5.2	Comedor .....	58
5.2.5.3	Cocina .....	58
5.2.5.4	Almacén cafetería .....	59
5.2.5.5	Cuarto de limpieza .....	59
5.2.5.6	Cuarto de basuras .....	59
5.2.5.7	Aseo femenino.....	59
5.2.5.8	Aseo masculino .....	59
5.2.6	<i>Oficinas</i> .....	59
5.2.6.1	Oficina 1.....	60
5.2.6.2	Oficina 2.....	60
5.2.6.3	Sala reuniones.....	61
5.2.6.4	Despacho Jefe Estación.....	61
5.2.6.5	Sala control .....	61
5.2.6.6	Oficina Diputación de Burgos.....	61
5.2.6.7	Sala conductores.....	61
5.2.6.8	Aseos femeninos.....	62
5.2.6.9	Aseos masculinos .....	62
5.2.6.10	Cuarto limpieza .....	62
<b>6</b>	<b>RUTAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN .....</b>	<b>64</b>
6.1	RUTAS OPERANDO ACTUALMENTE .....	65
6.1.1	<i>Datos de las rutas</i> .....	65
6.2	PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS.....	67

6.3	MODELOS Y ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN .....	68
6.3.1	<i>Modelo de Baaj and Mahmassani (1991)</i> .....	68
6.3.2	<i>Algoritmo de Baaj and Mahmassani (1991,1995)</i> .....	69
6.3.3	<i>Modelo propuesto para la resolución por GRASP del TNDP</i> .....	74
6.3.4	<i>Algoritmo GRASP multiobjetivo para el TNDP</i> .....	76
6.3.4.1	Razones para el uso de GRASP .....	76
6.3.4.2	Funcionamiento de GRASP .....	76
6.3.4.3	GRASP en TNDP.....	77
6.3.4.4	Construcción de soluciones en GRASP .....	77
6.3.4.5	Evaluación de soluciones .....	80
6.3.4.6	Mejora de soluciones.....	82
6.4	SOFTWARE UTILIZADO Y ESQUEMA DEL ALGORITMO GRASP IMPLEMENTADO .....	82
6.4.1	<i>Software utilizado</i> .....	82
6.4.2	<i>Esquema del algoritmo implementado</i> .....	83
6.4.2.1	Notebook “Datos” .....	83
6.4.2.2	Notebook “Construccion” .....	84
6.4.2.3	Notebook “Asignacion” .....	85
6.5	EVALUACIÓN DEL ALGORITMO GRASP IMPLEMENTADO .....	85
6.5.1	<i>Definición del problema de Mandl</i> .....	85
6.5.2	<i>Valor de los parámetros para el problema de Mandl</i> .....	88
6.5.3	<i>Resultados obtenidos con nuestro código GRASP</i> .....	89
6.5.3.1	Soluciones con 500 iteraciones.....	89
6.5.3.2	Soluciones con 1000 iteraciones.....	90
6.5.4	<i>Comparación de soluciones obtenidas</i> .....	96
6.6	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN PARA LAS RUTAS DE ARANDA DE DUERO .....	98
6.6.1	<i>Unidades generales del problema</i> .....	98
6.6.2	<i>Parámetros específicos del problema</i> .....	99
6.6.3	<i>Rutas Norte</i> .....	100
6.6.3.1	Parámetros de la red .....	101
6.6.3.2	Solución para las rutas actuales.....	103
6.6.3.3	Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida .....	103
6.6.3.4	Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas.....	104
6.6.3.5	Soluciones con modificación de parámetros .....	105
6.6.4	<i>Rutas Sur</i> .....	106
6.6.4.1	Parámetros de la red .....	107
6.6.4.2	Solución para las rutas actuales.....	108
6.6.4.3	Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida .....	108
6.6.4.4	Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas.....	109
6.6.4.5	Soluciones con modificación de parámetros .....	110
6.6.5	<i>Rutas Este</i> .....	113
6.6.5.1	Parámetros de la red .....	113
6.6.5.2	Solución para las rutas actuales.....	114
6.6.5.3	Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida .....	115
6.6.5.4	Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas.....	116
6.6.5.5	Soluciones con modificación de parámetros .....	117
6.6.6	<i>Rutas Oeste</i> .....	118
6.6.6.1	Parámetros de la red .....	119
6.6.6.2	Solución para las rutas actuales.....	120
6.6.6.3	Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida .....	120
6.6.6.4	Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas.....	121
6.6.6.5	Soluciones con modificación de parámetros .....	122
6.6.7	<i>Conclusiones</i> .....	124

<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE LA RED PRÓXIMA A LA TERMINAL.....</b>	<b>125</b>
7.1	ESTUDIO DEL TRÁFICO Y DE LOS EFECTOS INDUCIDOS POR LA IMPLANTACIÓN DE LA TERMINAL.....	126
7.1.1	<i>Herramienta Aimsun .....</i>	<i>126</i>
7.1.1.1	Generación del modelo con Aimsun .....	127
7.1.1.2	Plan de control de semáforos .....	128
7.1.1.3	Configuración de centroides .....	130
7.1.1.4	Creación de estado y demanda de tráfico .....	131
7.1.1.5	Simulación.....	132
7.1.2	<i>Simulación hora punta matinal. Análisis del tráfico. ....</i>	<i>135</i>
7.1.2.1	Plano de flujo .....	136
7.1.2.2	Plano de tiempo de demora .....	136
7.1.2.3	Plano de velocidad .....	137
7.1.2.4	Tabla resumen de los resultados obtenidos .....	138
7.1.2.5	Gráficas relevantes asociadas .....	139
7.1.3	<i>Simulación hora punta vespertina. Análisis del tráfico. ....</i>	<i>143</i>
7.1.3.1	Plano de flujo .....	144
7.1.3.2	Plano de tiempo de demora .....	144
7.1.3.3	Plano de velocidad .....	145
7.1.3.4	Tabla resumen de los resultados obtenidos .....	146
7.1.3.5	Gráficas relevantes asociadas .....	146
7.1.4	<i>Medidas correctoras.....</i>	<i>151</i>
7.1.4.1	Accesos a la terminal .....	151
7.1.4.2	Eliminación del cruce semafórico .....	153
7.1.5	<i>Estudio de la eficacia de la solución escogida. Simulación hora punta matinal.</i>	
	<i>Análisis de tráfico.....</i>	<i>156</i>
7.1.5.1	Plano de flujo .....	156
7.1.5.2	Plano de tiempo de demora .....	156
7.1.5.3	Plano de velocidad .....	157
7.1.5.4	Tabla resumen de los resultados obtenidos .....	158
7.1.5.5	Gráficas relevantes asociadas .....	158
7.1.1	<i>Estudio de la eficacia de la solución escogida. Simulación hora punta vespertina.</i>	
	<i>Análisis de tráfico.....</i>	<i>163</i>
7.1.1.1	Plano de flujo .....	163
7.1.1.2	Plano de tiempo de demora .....	164
7.1.1.3	Plano de velocidad .....	165
7.1.1.4	Tabla resumen de los resultados obtenidos .....	165
7.1.1.5	Gráficas relevantes asociadas .....	166
7.1.2	<i>Conclusiones de los resultados obtenidos .....</i>	<i>170</i>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>173</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO 1: PLANOS .....</b>	<b>177</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Situación actual [23] .....	14
Figura 4.1: Parcela ocupada [23] .....	27
Figura 4.2: Disposición en isla [28] .....	30
Figura 4.3: Disposición circular [25] .....	30
Figura 4.4: Disposición en línea [26] .....	30
Figura 4.5: Disposición en línea doble (Oposición) [24] .....	31
Figura 4.6: Disposición tipo mixto [27] .....	31
Figura 4.7: Esquema dentado 30º [10] .....	32
Figura 4.8: Esquema dentado 45º [10] .....	32
Figura 4.9: Esquema dentado 60º [10] .....	33
Figura 4.10: Esquema dentado 90º [10] .....	33
Figura 4.11: Esquema estacionamientos dentados 30º y 45º [10] .....	36
Figura 4.12: Esquema estacionamiento dentado 60º y 90º [10] .....	37
Figura 4.13: Dimensiones estacionamiento de bicicletas .....	38
Figura 4.14: Esquema dimensiones estancia de espera [10] .....	39
Figura 4.15: Esquema dimensionamiento aseos [10] .....	43
Figura 4.16: Esquema dimensionamiento mesas restauración [10] .....	44
Figura 6.1: Algoritmo RGA .....	71
Figura 6.2: Algoritmo TRUST .....	72
Figura 6.3: Algoritmo RIA .....	73
Figura 6.4: Algoritmo Baaj y Mahmassani .....	74
Figura 6.5: Seudocódigo construcción ávida aleatoria de recorridos [1] .....	78
Figura 6.6: Seudocódigo de inserción de nodos en recorridos [1] .....	79
Figura 6.7: Situación de los nodos en estudio antes de la inserción [1] .....	80
Figura 6.8: Situación de los nodos en estudio tras la inserción [1] .....	80
Figura 6.9: Seudocódigo algoritmo de asignación utilizado [1] .....	81
Figura 6.10: Red del caso de Mandl [1] .....	86
Figura 6.11: Frente Pareto 500 iteraciones .....	90
Figura 6.12: Frente Pareto 1000 iteraciones .....	91
Figura 6.13: Nodo de la rutas Norte .....	101
Figura 6.14: Nodos de la rutas Sur .....	106
Figura 6.15: Frente de Pareto soluciones rutas Sur .....	112
Figura 6.16: Nodos de la rutas Este .....	113
Figura 6.17: Nodos de la rutas Oeste .....	118
Figura 6.18: Frente de Pareto soluciones rutas Oeste .....	124
Figura 7.1: Red actual zona próxima a la estación .....	128
Figura 7.2: Grupos semafóricos generados .....	129
Figura 7.3: Fases semafóricas asignadas .....	130
Figura 7.4: Detalle creación Centroides .....	131
Figura 7.5: Vehículos/hora contabilizados en cada vía .....	132
Figura 7.6: Giros en las intersecciones .....	132
Figura 7.7: Pestaña creación escenario dinámico .....	134
Figura 7.8: Imagen de simulación .....	135

Figura 7.9: Plano de flujo situación actual matinal .....	136
Figura 7.10: Plano de tiempo de demora situación actual matinal .....	137
Figura 7.11: Plano de velocidad situación actual matinal .....	138
Figura 7.12 Gráfico cola media actual matinal .....	140
Figura 7.13: Gráfico densidad actual matinal.....	140
Figura 7.14 Gráfico flujo actual matinal .....	141
Figura 7.15 Gráfico número de paradas actual matinal.....	141
Figura 7.16: Gráfico tiempo de demora actual matinal .....	142
Figura 7.17: Gráfico tiempo de viaje actual matinal .....	142
Figura 7.18: Gráfico velocidad actual matinal.....	143
Figura 7.19: Plano de flujo situación actual vespertina .....	144
Figura 7.20: Plano de tiempo de demora situación actual vespertina.....	145
Figura 7.21: Plano de velocidad situación actual vespertina .....	145
Figura 7.22: Gráfico cola media actual vespertina .....	147
Figura 7.23: Gráfico densidad actual vespertina.....	148
Figura 7.24: Gráfico flujo actual vespertina .....	148
Figura 7.25: Gráfico número de paradas actual vespertina .....	149
Figura 7.26: Gráfico tiempo de demora actual vespertina .....	149
Figura 7.27: Gráfico tiempo de viaje actual vespertina .....	150
Figura 7.28: Gráfico velocidad actual vespertina .....	150
Figura 7.29: Situación actual de la red próxima a la terminal.....	152
Figura 7.30: Rotondas de acceso a la nueva terminal.....	152
Figura 7.31: Detalle de acceso al a nueva terminal.....	153
Figura 7.32: Situación actual de la red en el cruce semafórico .....	155
Figura 7.33: Diseño de solución de cruce con rotonda .....	155
Figura 7.34: Plano de flujo situación corregida matinal.....	156
Figura 7.35: Plano de tiempo de demora situación corregida matinal .....	157
Figura 7.36: Plano de velocidad situación corregida matinal.....	157
Figura 7.37: Gráfico cola media corregida matinal .....	159
Figura 7.38: Gráfico densidad corregida matinal .....	160
Figura 7.39: Gráfico flujo corregida matinal.....	160
Figura 7.40: Gráfico número de paradas corregida matinal .....	161
Figura 7.41: Gráfico tiempo de demora corregida matinal.....	161
Figura 7.42: Gráfico tiempo de viaje corregida matinal.....	162
Figura 7.43: Gráfico velocidad corregida matinal .....	162
Figura 7.44: Plano de flujo situación corregida vespertina .....	164
Figura 7.45: Plano de tiempo de demora situación corregida vespertina .....	164
Figura 7.46: Plano de velocidad situación corregida vespertina.....	165
Figura 7.47: Gráfico cola media corregida vespertina .....	167
Figura 7.48: Gráfico densidad corregida vespertina .....	167
Figura 7.49: Gráfico flujo corregida vespertina.....	168
Figura 7.50: Gráfico número de paradas corregida vespertina .....	168
Figura 7.51: Gráfico tiempo de demora corregida vespertina .....	169
Figura 7.52: Gráfico tiempo de viaje corregida vespertina .....	169
Figura 7.53: Gráfico velocidad corregida vespertina.....	170

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Datos históricos [15] y [20].....	19
Tabla 3.2: Estadísticas de la regresión.....	19
Tabla 3.3: Análisis de varianza.....	20
Tabla 3.4: Valor de las constantes.....	20
Tabla 3.5: Previsión de demanda [15], [20] y [21] .....	21
Tabla 3.6: Corrección por demanda inducida .....	22
Tabla 3.7: Corrección por demanda generada .....	23
Tabla 3.8: Datos definitivos para dimensionar la terminal .....	24
Tabla 4.1: Histórico de ocupación de autobuses en la terminal actual .....	28
Tabla 4.2: Dimensiones según esquema [10].....	34
Tabla 4.3: Dimensiones según esquemas de estacionamientos [10].....	38
Tabla 4.4: Valores típicos de superficie neta para zonas de oficina [29] .....	46
Tabla 4.5: Cuadro dimensionado sala de reuniones [29].....	47
Tabla 5.1: Cuadro de superficies .....	63
Tabla 6.1: Datos rutas actuales .....	66
Tabla 6.2: Matriz de demanda caso Mandl [1].....	87
Tabla 6.3: Matriz de conectividad caso Mandl.....	87
Tabla 6.4: Matriz origen-destino caso Mandl.....	88
Tabla 6.5: Resultados funciones objetivo 500 iteraciones .....	90
Tabla 6.6: Resultados funciones objetivo 1000 iteraciones .....	91
Tabla 6.7: Comparativa de soluciones de diversos métodos .....	97
Tabla 6.8: Matriz de conectividad de la red Norte .....	102
Tabla 6.9: Matriz origen-destino de la red Norte.....	102
Tabla 6.10: Matriz de demanda de la red Norte .....	102
Tabla 6.11: Solución actual rutas Norte .....	103
Tabla 6.12: Solución actual optimización de frecuencias rutas Norte .....	103
Tabla 6.13: Soluciones no dominadas en rutas Norte con generación de rutas.....	104
Tabla 6.14: Matriz de conectividad de la red Sur .....	107
Tabla 6.15: Matriz origen-destino de la red Sur.....	107
Tabla 6.16: Matriz de demanda de la red Sur .....	108
Tabla 6.17: Solución rutas actuales rutas Sur.....	108
Tabla 6.18: Solución actual optimización de frecuencias rutas Sur .....	109
Tabla 6.19: Soluciones no dominadas en rutas Sur con generación de rutas.....	109
Tabla 6.20: Soluciones rutas Sur con CAP = 18 .....	110
Tabla 6.21: Soluciones rutas Sur con CAP = 35 .....	111
Tabla 6.22: Matriz de conectividad de la red Este .....	113
Tabla 6.23: Matriz origen-destino de la red Este .....	114
Tabla 6.24: Matriz de demanda de la red Este.....	114
Tabla 6.25: Solución rutas actuales rutas Este .....	115
Tabla 6.26: Solución actual optimización de frecuencias rutas Este.....	115
Tabla 6.27: Soluciones no dominadas en rutas Este con generación de rutas .....	116
Tabla 6.28: Matriz de conectividad de la red Oeste.....	119
Tabla 6.29: Matriz origen-destino de la red Oeste.....	119



Tabla 6.30: Matriz de demanda de la red Oeste .....	119
Tabla 6.31: Solución rutas actuales rutas Oeste .....	120
Tabla 6.32: Solución actual optimización de frecuencias rutas Oeste .....	120
Tabla 6.33: Soluciones no dominadas en rutas Oeste con generación de rutas.....	121
Tabla 6.34: Soluciones rutas Oeste con CAP = 18 .....	123
Tabla 7.1: Ejemplo ficha de análisis de tráfico .....	127
Tabla 7.2: Tabla resumen situación actual matinal.....	139
Tabla 7.3: Tabla resumen situación actual vespertina .....	146
Tabla 7.4: Tabla resumen situación corregida matinal .....	158
Tabla 7.5: Tabla resumen situación corregida vespertina.....	166
Tabla 7.6: Tabla resumen resultados hora punta matinal .....	171
Tabla 7.7: Tabla resumen resultados hora punta vespertina.....	171

**1 OBJETIVO DEL PROYECTO Y  
JUSTIFICACION DE LA LOCALIDAD  
ESCOGIDA**

La finalidad del presente proyecto Fin de Carrera es la de desarrollar un estudio completo sobre la concepción de una nueva estación de autobuses. Esto comprende principalmente el diseño de la terminal, el análisis del impacto en el tráfico actual de la ciudad que la implantación de la terminal conllevará y el estudio de las diferentes rutas que tienen relación con la misma.

Para la parte de diseño de la terminal se cree oportuno basarse en la funcionalidad de la misma, buscando siempre la facilidad de los movimientos tanto de los usuarios a pie como de los distintos vehículos que accederán a la nueva instalación.

La parte del análisis de la red próxima a la nueva terminal se efectúa gracias a la herramienta informática Aimsun, que facilitará todos los análisis a efectuar gracias a las simulaciones llevadas a cabo.

En la parte de análisis de rutas, se implementará un algoritmo de tipo genético para la optimización heurística de las diferentes rutas asociadas a la terminal en estudio, de tal forma que sea lo más general posible para poderlo extrapolar a cualquier caso generalizado.

En cuanto a la localidad, para poder realizar un estudio de estas características se ha estimado que la población asociada a la misma debería estar comprendida entre los 20.000 y los 50.000 habitantes, de tal forma que tanto las dimensiones de la terminal como el número de rutas sean el adecuado para el estudio detallado de ambas. Puesto que con ciudades más pequeñas el estudio podría considerarse incompleto, y con ciudades mayores la complejidad podría hacer que el análisis no fuese lo suficientemente claro y detallado, cualidades que se marcan como objetivo en el inicio de este proyecto Fin de Carrera.

La localidad escogida para la implantación de la nueva estación de autobuses es Aranda de Duero, localizada en la zona Sur de la provincia de Burgos. Las razones que han llevado a esta elección han sido varias. En primer lugar su población se encuentra entre los márgenes establecidos anteriormente, ya que cuenta con una población residente a 1 de Enero de 2014 de 33.065 habitantes. Además la estación actual de autobuses de la localidad se encuentra envejecida y deteriorada, por no hablar de la escasez de servicios prestados en el interior de la terminal.

Además se trata de una ciudad importante en cuanto al turismo enológico y gastronómico de interior en España, puesto que se trata de la capital de la Ribera del Duero burgalesa, lo cual supone movilidad de usuarios a tener en cuenta.

Otro punto a tener en cuenta es la situación geográfica de la localidad, la ciudad se encuentra situada entre Madrid y Burgos, lo que la convierte en un

nudo estratégico para la movilidad por carretera en la zona Norte de España.

Las carreteras que transcurren por la capital Ribereña son:

- Autovía del Norte **A-1**: Madrid - Irún.
- Carretera nacional **N-122** : Valladolid - Soria.
- Carretera comarcal **CL-603** : Aranda de Duero – Segovia.
- Carretera comarcal **CL-619** : Aranda de Duero – Palencia.
- Carretera comarcal **BU-120** : Aranda de Duero – Roa de Duero.
- Carretera comarcal **BU-910** : Aranda de Duero – Caleruega.
- Carretera comarcal **BU-925** : Aranda de Duero – La Gallega.
- Carretera comarcal **BU-945** : Aranda de Duero – Sigüenza.
- Carretera local **BU-P-1102** : Aranda de Duero – Sotillo de la Ribera.

Esta posición estratégica se la otorga sobre todo el paso de las dos primeras carreteras mencionadas, siendo la A-1 la principal vía Norte-Sur de la zona Norte de España y la N-122 una carretera fundamental para el tránsito Este-Oeste en esa misma zona Norte. Por ello y debido a que se pretende también hacer un estudio de parámetros y optimización de diferentes rutas en autobús, esta localidad aporta la variedad de vías necesaria para que el estudio pueda ser completo y extrapolable a la mayoría de situaciones posibles.

## **2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE AUTOBUSES**

## 2.1 Emplazamiento actual y acceso

La estación de autobuses actualmente se encuentra en la zona Oeste del núcleo urbano de la localidad. La dirección de la misma es Avenida Valladolid s/n, y su situación viene detallada en la Figura 2.1. La parcela en la que está situada queda limitada en el Norte y en el Sur por otras dos parcelas colindantes no urbanizadas, en el Este por la Avenida Doña Ruperta Baraya y en el Oeste por la línea actual de ferrocarril.



Figura 2.1: Situación actual [23]

El acceso se realiza a través de la Avda. de Doña Ruperta Baraya, carácter bidireccional tanto para los autobuses como para el acceso al parking de los usuarios. Este acceso es una de las cuestiones a mejorar con este proyecto ya que en este momento los autobuses de gran tamaño que van a acceder a la estación con un giro hacia su derecha deben invadir el sentido contrario para poder alcanzar un radio de giro suficiente que le permita el acceso. De igual forma el acceso desde el otro sentido de la vía, es decir

acceder con un giro hacia la izquierda implica ceder el paso a los vehículos que circulan en sentido contrario hasta poder invadir ese carril para acceder a la terminal, con el riesgo que ello conlleva.

Por lo tanto, es necesario un estudio del tráfico en la zona próxima a la estación de tal manera que estos problemas de acceso queden solucionados.

## 2.2 Zona comercial

La estación de autobuses fue construida en 1988 por la Junta de Castilla y León y reformada en 2007. Pese a esto hoy en día la terminal no presta ninguno de los tipos de servicio que se programaron durante su construcción, a excepción de la expedición de billetes por una única taquilla para todos los viajes que parten de la misma. Por lo tanto, se plantea la necesidad de diseñar una estación que ofrezca al usuario los servicios asociados a este tipo de terminal, como pueden ser: cafetería y cocina, tiendas, librería, información, mantenimiento, consigna, taquillas, facturación, etc.

## 2.3 Zona dársenas

Se pretende que la nueva estación se adecúe a la demanda que se prevé que la estación pueda tener, para ello se realizara un estudio de previsión de demanda. Además es necesario el estudio de la circulación de los autobuses en el interior de la misma ya que en la distribución de dársenas actual podría haber conflicto ya que tanto la entrada de autobuses como la salida comparten superficies de maniobra.

## 2.4 Transporte ferroviario

En la actualidad el transporte ferroviario arandino se encuentra en decadencia, perdiendo usuarios año a año llegando a un punto tal que hoy por hoy prácticamente se limita al transporte de mercancías. Por su proximidad a la estación ferroviaria, se pretende que esta nueva terminal de autobuses sea diseñada de tal manera que sirva de impulso para el ferrocarril, teniendo en mente una posible adaptación futura a una terminal intermodal (autobús-ferrocarril).

### **3 ESTUDIO DE DEMANDA**



### 3.1 Introducción

La finalidad del presente estudio de demanda es establecer la viabilidad de implantación de una nueva estación de Autobuses en la localidad de Aranda de Duero no es tanto el realizar un estudio económico-financiero, ya que al tratarse de un Proyecto Fin de Carrera esta viabilidad económica se da por supuesta y no es el objetivo a alcanzar. Lo que sí es primordial analizar es la viabilidad socioeconómica realizando un estudio de la demanda histórica de la estación actual y una previsión de la misma a 15 años, de tal manera que se pueda predecir el uso que la estación tendrá y adaptar la terminal al mismo.

### 3.2 Demanda

#### 3.2.1 Bases para el estudio

Los datos de viajeros de la estación (serie histórica desde 2000) mostrados en la Tabla 3.1 son llamativos ya que se mantuvo prácticamente estable durante años de bonanza económica, pero con pérdida paulatina de ocupación de vehículos, lo que se traduce en una progresiva ineficacia del sistema, también de los datos se desprende un pequeño aumento de la oferta que no consiguió captar más usuarios. Sin embargo, en la época de crisis, se nota un aumento de la demanda que solo remite en 2011.

En el estudio se valorarán la demanda en las siguientes componentes, teniendo en cuenta su fórmula de cálculo:

- a) Demanda tendencial, es la demanda básica que responde a la situación demográfica y socioeconómica de la localidad, el modelo utilizado será modelo estadístico basado en los valores de población y PIB como indicadores socioeconómicos. Se decide utilizar este tipo de modelos ya que por lo general funcionan bien para corto y medio plazo, suficientes para cubrir el periodo de explotación estimado para la terminal que es de 20 años.
- b) Demanda inducida, basada en la experiencia de otras infraestructuras de la misma localidad, se decide aplicar un factor de corrección facilitado por el Ayuntamiento sobre la demanda tendencial, aunque bien es cierto que esta demanda inducida con el tiempo tiende a cero, es necesaria tenerla en cuenta ya que se dimensiona la estación para el día con mayor previsión de demanda, de tal manera que se esté siempre del lado de la seguridad.
- c) Demanda generada, usuarios que no usaban los servicios de la anterior estación, pero afirma usar la nueva. Este valor se suele utilizar en nuevas infraestructuras y se obtiene por medio de encuestas realizadas por el Ayuntamiento, es obvio que estas encuestas para el presente proyecto no se han realizado, pero se

calculará usando valores típicos en estos casos.

- d) Demanda convertida asociada a la posible intermodalidad futura de la terminal. Como se trataría de la aparición de un importante competidor en el mercado, este componente de demanda siempre tiene una componente negativa sobre la demanda total, estimada según otros estudios similares en torno a un descenso del 2,5% de la demanda total, como su valor es pequeño e incluirlo reduciría la demanda, no se tendrá en cuenta y ayudará a quedarse en cualquier caso en el lado de la seguridad al dimensionar terminal y rutas.

### 3.2.2 Cálculo de la demanda

#### 3.2.2.1 Demanda tendencial

La demanda tendencial es el valor básico en el cálculo de demanda. El estudio de la demanda se realizará a partir de dos variables como son la población y el PIB, que nos ayudarán a obtener una estimación futura de la demanda ya que son variables para las cuales se realizan estudios de previsión. Para obtenerlo se aplicará un modelo lineal múltiple, y se revisará la bondad del mismo estimada a partir del coeficiente de determinación  $R^2$ .

$$Demanda = k + a \cdot Población + b \cdot PIB$$

donde:  $k$ ,  $a$  y  $b$  son constantes.  $k$  se trata de una constante aislada que puede significar en cierta medida la demanda estable o inalterable, y  $a$  y  $b$  van asociadas y ponderan la variabilidad producida por la población y el PIB respectivamente.

Para poder conocer la demanda futura se debe obtener primero los valores de las constantes  $k$ ,  $a$  y  $b$ . Esto se hace resolviendo el problema de regresión lineal múltiple que plantea el modelo a partir de los datos históricos mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos históricos [15] y [20]

Año	Demanda	Demanda % Variación	Población	PIB % Variación
2000	159035	-	29762	5,053
2001	169054	6,30%	29999	3,671
2002	183931	8,80%	30309	2,707
2003	173998	-5,40%	30706	3,088
2004	178870	2,80%	30875	3,257
2005	176366	-1,40%	31247	3,588
2006	179364	1,70%	31545	4,075
2007	178467	-0,50%	31940	3,479
2008	186498	4,50%	32460	0,893
2009	204775	9,80%	32928	-3,832
2010	212557	3,80%	33154	-0,203
2011	207668	-2,30%	33229	0,052
2012	202999	-5,90%	33257	-1,643
2013	191689	-12,30%	33257	-1,220
2014	170694	4,50%	33065	1,312

Los datos de la Tabla 3.1 han sido facilitados por la actual estación de Aranda de Duero y obtenidos también a partir de las referencias bibliográficas indicadas

A partir de estos datos se ha resuelto el problema de regresión múltiple con una hoja de cálculo, obteniendo los resultados expresados en la Tabla 3.2, Tabla 3.3 y Tabla 3.4.

Tabla 3.2: Estadísticas de la regresión

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,83627478
Coeficiente de determinación $R^2$	0,699355507
$R^2$ ajustado	0,649248092
Error típico	9333,441852
Observaciones	15

Tabla 3.3: Análisis de varianza

Análisis de varianza					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	2431698041	1215849020	13,95712593	0,000738447
Residuos	12	1045357642	87113136,81		
Total	14	3477055683			

Tabla 3.4: Valor de las constantes

Valor constantes	
	<b>Coeficientes</b>
<b>Intercepción (k)</b>	k=86864,3628807725
<b>Variable X 1 (Población)</b>	a=3,27338577275873
<b>Variable X 2 (% Variación PIB)</b>	b=-3740,31303970414

De estos resultados se desprende que el modelo planteado se puede considerar bueno ya que otorga un valor del coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,7$  aproximadamente, siendo este un valor aceptable para estudios de este tipo, tal y como se indica en [22].

Por otro lado se puede ya plantear el modelo con los valores correspondientes de las variables, es el que sigue:

$$Demanda = 86864,3629 + 3,2734 \cdot Población - 3740,3130 \cdot \%PIB$$

A partir de este modelo y con las estimaciones de población y de variación del PIB para años futuros se realiza una previsión de la demanda para la futura Terminal, los datos son los mostrados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Previsión de demanda [15], [20] y [21]

Año	Población	PIB (% Variación)	Demanda
2015	32819	1,687	187984
2016	32581	1,789	186823
2017	32349	1,846	185851
2018	32123	1,903	184899
2019	31903	2,026	183716
2020	31687	2,104	182719
2021	31476	2,148	181863
2022	31270	2,211	180953
2023	31068	2,257	180120
2024	30870	2,298	179319
2025	30676	2,351	178487
2026	30487	2,394	177706
2027	30302	2,449	176893
2028	30120	2,508	176078
2029	29942	2,551	175335
2030	29841	2,587	174869

Cabe reseñar que estos estudios basados en previsiones son muy sensibles a la fiabilidad de las fuentes de las que se obtienen dichos valores, en este caso tratándose dichas fuentes del Instituto Nacional de Estadística y de la base de datos del Fondo Monetario Internacional se puede aseverar que estas son suficientemente válidas para el estudio a realizar.

Este es un estudio planteando una evolución estable de los valores estimados, es decir no se mueve en un escenario de oportunidad en el cual los resultados serían más halagüeños ni en un escenario prudente. Se explica mejor a continuación.

Las Proyecciones de Población, proporcionan una simulación de la población que residiría en España, desagregada según características demográficas básicas, para los próximos años partiendo de la estimación de la población a 1 de enero del año en curso. Se ofrece esta información cada 2 años con un horizonte proyectivo de 50 años para el total nacional y 15 para las comunidades autónomas y provincias, según características demográficas básicas. Responden a la necesidad de disponer de una visión desde la perspectiva actual de la posible realidad demográfica futura, actualizada a la evolución demográfica más reciente. En concreto, se trata de simular los efectos que sobre la población futura tendrían la estructura demográfica y las tendencias demográficas presentes.

### 3.2.2.2 Demanda inducida

Se estima que la demanda inducida se puede obtener gracias a la experiencia del Ayuntamiento de Aranda de Duero en otras infraestructuras con un valor del 2% a mayores sobre la demanda tendencial, valor que con el paso de los años tiende a 0, de tal manera que distribuyendo de forma lineal este porcentaje en los 5 años siguientes a la implantación de la terminal, los valores de demanda quedarían como se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Corrección por demanda inducida

Año	% Corrección	Demanda previa	Demanda corregida
2015	2	187984	191744
2016	1,6	186823	189812
2017	1,2	185851	188081
2018	0,8	184899	186378
2019	0,4	183716	184451
2020	-	182719	182719
2021	-	181863	181863
2022	-	180953	180953
2023	-	180120	180120
2024	-	179319	179319
2025	-	178487	178487
2026	-	177706	177706
2027	-	176893	176893
2028	-	176078	176078
2029	-	175335	175335
2030	-	174869	174869

### 3.2.2.3 Demanda generada

Se puede establecer para este caso el valor de un 1,5% de aumento del valor de la demanda por generación, se corresponde con usuarios que por encuesta afirman que no usaban la terminal anterior pero si usaran la nueva, se aplicará a todos los años del estudio. Se muestran estos resultados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Corrección por demanda generada

Año	% Corrección	Demanda previa	Demanda corregida
2015	1,5	191744	194620
2016	1,5	189812	192659
2017	1,5	188081	190903
2018	1,5	186378	189173
2019	1,5	184451	187218
2020	1,5	182719	185460
2021	1,5	181863	184591
2022	1,5	180953	183668
2023	1,5	180120	182821
2024	1,5	179319	182009
2025	1,5	178487	181164
2026	1,5	177706	180372
2027	1,5	176893	179547
2028	1,5	176078	178720
2029	1,5	175335	177965
2030	1,5	174869	177492

#### 3.2.2.4 Demanda en hora punta del día más desfavorable del año

La demanda de hora punta es un valor que hace falta calcular para poder conocer el número mínimo de dársenas que deberá tener operativas la estación. Para ello hay que basarse en el histórico de la estación de autobuses, que revela que el factor de corrección a aplicar a la demanda media diaria para obtener la demanda en el día de mayor demanda del año es de 1,28.

Este valor se debe aplicar en el año que se prevé que exista una mayor demanda, es decir en 2015. En primer lugar se debe calcular la demanda de un día medio laboral (DML), que se obtiene dividiendo la demanda anual entre el número de días de uso relevante de la estación, que se estima en torno a los 285 días cada año.

Una vez que se ha obtenido ese dato, se aplica el factor de corrección de día punta, que como se mencionó es de 1,28 basado en datos estadísticos de funcionamiento de la actual terminal, obteniendo el valor de la demanda en día punta (DP) del año.

Se está ya en disposición de conocer el número de viajeros que habrá por término medio en el día más desfavorable del año, para ello se divide el valor que se ha obtenido anteriormente entre el número de horas prácticas de la estación, que también se estiman a partir de valores históricos de la estación

actual, este valor es 11 horas cada día. Con esto se obtiene la demanda en hora media del día punta (HMDP).

Y de nuevo se aplica un factor de corrección a esa demanda media en el día más desfavorable para obtener la demanda en la hora punta del día más desfavorable del año, este valor estimado a partir de estudios estadísticos es de 1,25, para con él obtener la demanda de hora punta en día punta del año (HPDP).

Con todo lo anterior se construye la Tabla 3.8, que muestra los datos definitivos para el dimensionado de la terminal:

**Tabla 3.8: Datos definitivos para dimensionar la terminal**

<b>Año</b>	<b>Demanda</b>	<b>Demanda DML</b>	<b>Demanda DP</b>	<b>Demanda HMDP</b>	<b>Demanda HPDP</b>
2015	194620	683	877	80	109

De lo que se desprende que en la hora punta del día más desfavorable del año habrá 109 usuarios en la terminal con la expectativa de realizar un viaje.

Estos datos obtenidos mediante este análisis de previsión de demanda serán utilizados en los siguientes capítulos con la finalidad de ajustar los servicios, dimensiones y funcionalidad de las instalaciones a los mismos, de tal manera que la concepción sea la mejor para la utilización de la terminal por los usuarios.



## **4 DIMENSIONAMIENTO DE LA TERMINAL**

Como se va a realizar la elección de diseño de cada una de las áreas de la terminal por análisis multicriterio entre alternativas, se debe en primer lugar estudiar en base a que realizar este análisis.

El punto de partida es centrarse en un objetivo común, y como no puede ser de otra manera este objetivo para una terminal de autobuses debe ser el de ofrecer un servicio de calidad al cliente. Por lo que se debe identificar el tipo de cliente al que se busca satisfacer.

Por lo general todas las organizaciones de este tipo, tienen dos tipos de clientes, clientes internos (los propios empleados, ya que son receptores de los resultados de algunos procesos que tienen lugar en la organización) y clientes externos (clientes del servicio prestado o usuarios). Con lo cual a la hora de priorizar en ponderadores se debe tener en cuenta aquellos factores que hagan que la calidad del servicio para los dos grupos de clientes sea la más alta posible, así como cuestiones económicas, estéticas y medioambientales entre otras.

El dimensionamiento de las estaciones debe atender al objetivo para el que se ha construido la infraestructura y quiénes son sus potenciales usuarios (viajeros, vehículos, etc.), lo que no es tarea fácil y está influido por numerosos factores.

Sin embargo, no existe actualmente ningún estudio o publicación en España u otro país de la Unión Europea que haga referencia a estos aspectos o indique ratios medios para el diseño de estaciones. En Estados Unidos y siguiendo el modelo del manual de capacidad de tráfico, se ha realizado un manual sobre capacidad de tránsito y calidad del servicio [9], aplicable a estaciones de autobús. Todos los datos numéricos que se mencionen a continuación proceden de este manual y deben entenderse como meramente orientativos.

Por otra parte, las estaciones de autobús, como terminales de pasajeros no se diferencian conceptualmente mucho de otras terminales relativas a otros modos. Por este motivo, y para poder completar los criterios estadounidenses antes mencionados con otros aplicados en España, se han estudiado también factores aplicados a otros modos en España.

Con todo ello, se ha conseguido obtener unos ratios para factores de dimensionamiento que se pueden aplicar para la terminal en cuestión, sin perjuicio de las naturales adaptaciones que sean precisas a cada caso particular.

Según este manual, los principales aspectos a analizar dentro de una estación de autobuses se pueden dividir entre externos e internos de la

terminal.

En todos los casos se debe dimensionar atendiendo a la demanda máxima esperada en hora punta, tanto en lo referente a viajeros como vehículos en la estación, estableciendo el nivel de servicio en que se desea que se opere durante esas puntas y siendo consciente de la probabilidad de saturación de la infraestructura según el nivel de servicio elegido. Es por ello que los estudios de demanda, necesarios para la realización de los proyectos de las estaciones de autobús deben realizarse con el máximo rigor.

#### 4.1 Estudio de la parcela

La parcela en la que se encuentra la actual estación tiene una superficie de 13500 m<sup>2</sup>. Se puede ver en la imagen aérea mostrada en la Figura 4.1.

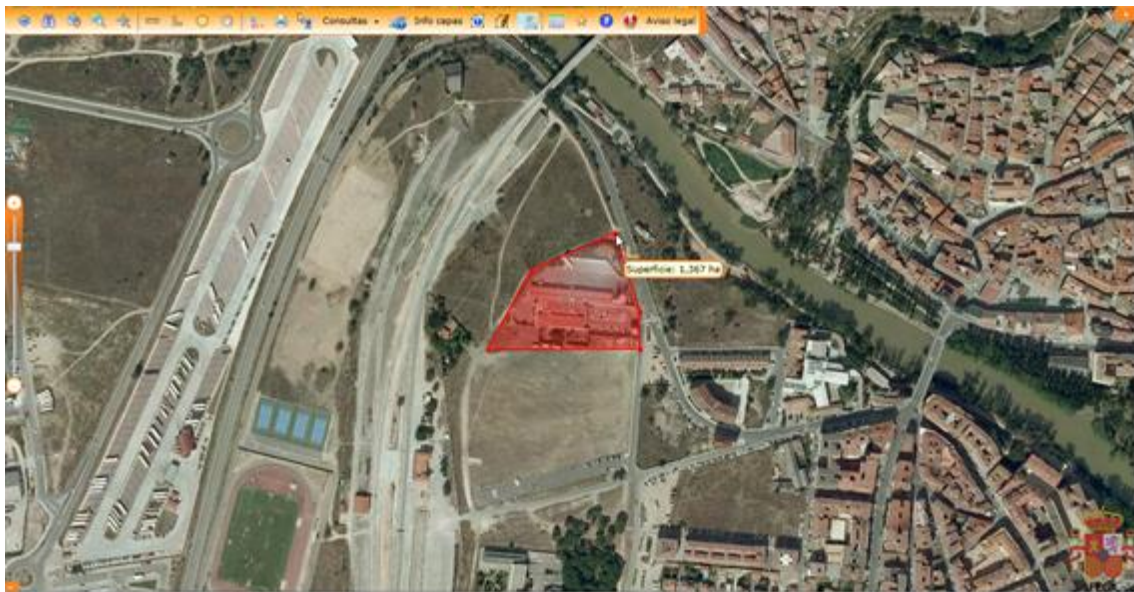


Figura 4.1: Parcela ocupada [23]

La parcela no es un problema ya que las parcelas colindantes son solares y se podría construir en ellas sin ningún tipo de problema ya que pertenecen ambas al Ayuntamiento de Aranda de Duero, con lo que no habrá ningún problema de superficie en el proyecto.

La idea es que la nueva estación se implante sobre el mismo terreno en el que se encuentra la actual utilizando, en caso de ser necesario, más superficie perteneciente a las parcelas colindantes. Se decide implantar la nueva terminal en esta misma zona por su buena ubicación cercana al ferrocarril que cruza la ciudad, dejando de esta manera la puerta abierta a una readaptación a una estación intermodal en el futuro.

#### 4.2 Cálculo de número de dársenas

El planeamiento de las dársenas en su “lado carretera” debe realizarse

para el valor punta anual, pues no sería físicamente de otra forma posible estacionar los vehículos en las dársenas en esa hora de estudio.

En primer lugar para poder realizar cualquier dimensionamiento de la estación se debe conocer el número de dársenas mínimo que deberá tener la estación para poder dar servicio sin problemas de demoras, para ello hay que saber antes que nada la ocupación media de los autobuses en esta estación, del cual se tiene una referencia histórica contemplada en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Histórico de ocupación de autobuses en la terminal actual**

<b>Año</b>	<b>Demanda (usuarios)</b>	<b>Crecimiento anual Demanda</b>	<b>Expediciones</b>	<b>Crecimiento anual expediciones</b>	<b>Ocupación media (usuarios/bus)</b>
2000	159035	-	10492	-	15,2
2001	169054	6,30%	11332	8,00%	14,9
2002	183931	8,80%	13337	17,70%	13,8
2003	173998	-5,40%	13231	-0,80%	13,2
2004	178870	2,80%	13694	3,50%	13,1
2005	176366	-1,40%	13625	-0,50%	12,9
2006	179364	1,70%	13530	-0,70%	13,3
2007	178467	-0,50%	13949	3,10%	12,8
2008	186498	4,50%	15247	9,30%	12,2
2009	204775	9,80%	16695	9,50%	12,3
2010	212557	3,80%	17463	4,60%	12,2
2011	207668	-2,30%	17306	-0,90%	12,0
2012	202999	-5,90%	16851	-2,63%	12,0
2013	191689	-12,30%	14939	-11,35%	12,8
2014	170694	4,50%	14027	-6,10%	12,2

En lugar de hacer la media de las ocupaciones medias históricas en la estación actual, se calcula para el mínimo valor establecido que es de 12 usuarios, con lo que la siguiente expresión muestra el número de autobuses que deben salir de la estación el día más conflictivo del año en la hora punta del día para una ocupación media de 12 usuarios por autobús:

$$N^{\circ} \text{ buses} = \frac{109 \text{ usuarios/hora}}{12 \text{ usuarios/bus}} = 9,08 \frac{\text{buses}}{\text{hora}} \sim 10 \text{ buses/hora}$$

Teniendo en cuenta ahora el tiempo de operación medio en la estación de los distintos autobuses, aumentándolo con un factor de 1,5 para estar siempre del lado de la seguridad, que se estima en 45 min, se podrá obtener el número de dársenas necesarias para la estación con la expresión:

$$N^{\circ} \text{ dársenas} = 10 \frac{N^{\circ} \text{ buses}}{\text{hora}} \cdot 1 \frac{\text{hora} \cdot \text{ dársena}}{\text{bus}} = 10 \text{ dársenas}$$

Por lo tanto, se debe dimensionar la terminal con un mínimo de 10 dársenas para poder dar servicio de manera simultánea en todas ellas ese día de mayor conflicto del año.

### 4.3 Áreas y servicios distinguibles dentro de la terminal

#### 4.3.1 Organización general

Antes de entrar con áreas más detalladas, se planteará la distribución general de la estación. De forma general se puede decir que habrá dos opciones claramente diferenciadas, organizar las áreas de la estación en diferentes plantas o niveles u organizarlas en uno solo.

Los factores a tener en cuenta para este análisis serán: facilidad de movilidad de las personas, superficie ocupada y coste de realización de obras.

Se ha tomado la decisión de dar importancia a la facilidad de movilidad de las personas, y de igual forma se da prioridad al coste de realización de las obras ante la superficie ocupada ya que esta no será un problema debido a que la parcela es suficientemente grande para ambas alternativas y es propiedad del Ayuntamiento.

Por esos motivos, se entiende que será mejor diseñar toda la estación en un único nivel, ya que se eliminan ascensores, escalera y escaleras mecánicas que podrían convertirse en cuellos de botella para esta movilidad de usuarios. En cuanto al coste de ejecución, para una calidad de materiales similares se estima menor realizar las obras en un solo nivel que en varios.

#### 4.3.2 Zona Dársenas

En este punto existen diferentes criterios para escoger nuestra distribución de dársenas, algunas de las concepciones típicas podrían ser:

- Disposición en isla (Figura 4.2).
- Disposición circular interior (Figura 4.3). Existe también la disposición circular exterior.
- Disposición en línea (Figura 4.4).
- Disposición en línea doble (oposición) (Figura 4.5).
- Disposición tipo mixto (Figura 4.6).





Figura 4.2: Disposición en isla [28]

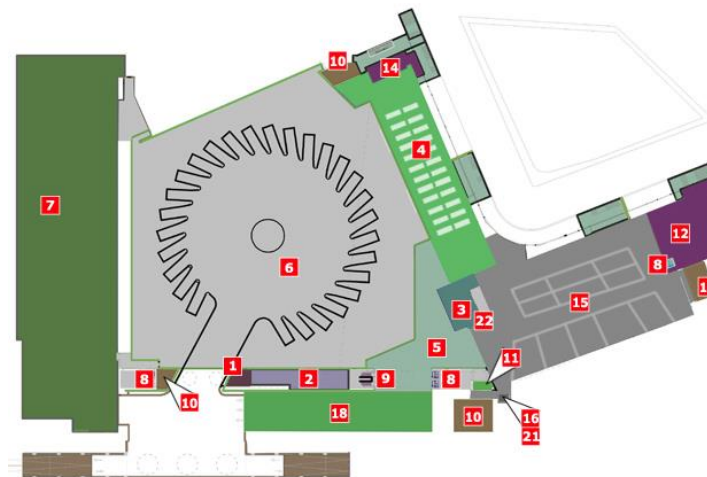


Figura 4.3: Disposición circular [25]

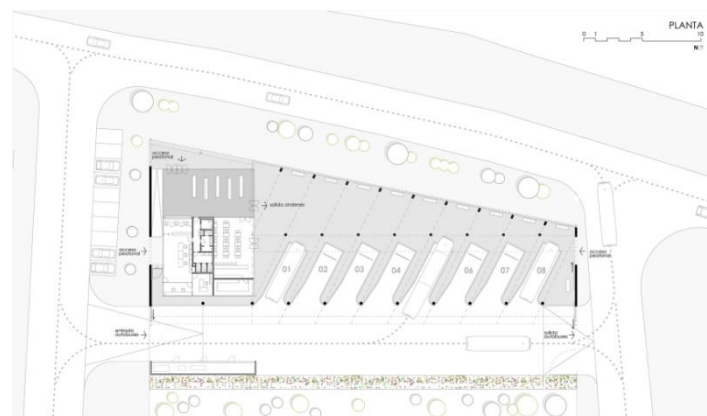


Figura 4.4: Disposición en línea [26]

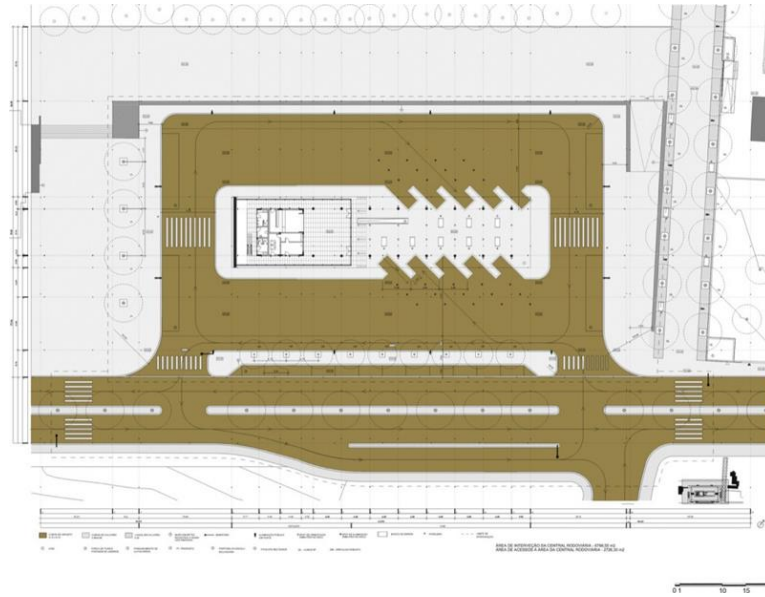


Figura 4.5: Disposición en línea doble (Oposición) [24]



Figura 4.6: Disposición tipo mixto [27]

#### 4.3.2.1 Área de dársenas

En este caso, lo que se busca es que el usuario tenga que trasladarse lo menos posible por la zona de dársenas ya que suele ir cargado con equipaje, y su percepción de la calidad de servicio disminuye exponencialmente a medida que recorre metros de esta forma. Además, la zona de dársenas debe estar separada físicamente de la zona de espera [7]. De esta forma, se evitan factores molestos como son la contaminación ambiental y acústica producida por los motores de combustión de los vehículos, el tener que soportar frío en invierno o calor en verano, consideraciones que al tenerlas en cuenta hacen que el nivel de servicio ofrecido aumente mucho de cara al usuario.

De tal manera que finalmente es escogida una distribución de las

dársenas semicircular externa, y el edificio de la terminal cubrirá en gran parte ese semicírculo, teniendo diversas puertas para que el usuario salga lo más cerca posible de su dársena, teniéndose que desplazar de esta forma lo menos posible. Además de optimizar esos desplazamientos de los usuarios con esta medida también se da a la estación un toque estético y moderno alejándose de las típicas distribuciones en línea.

El dimensionado de esta zona se basa en los esquemas:

- Esquema dentado a  $30^\circ$  (Figura 4.7).
- Esquema dentado a  $45^\circ$  (Figura 4.8).
- Esquema dentado a  $60^\circ$  (Figura 4.9).
- Esquema dentado a  $90^\circ$  (Figura 4.10).

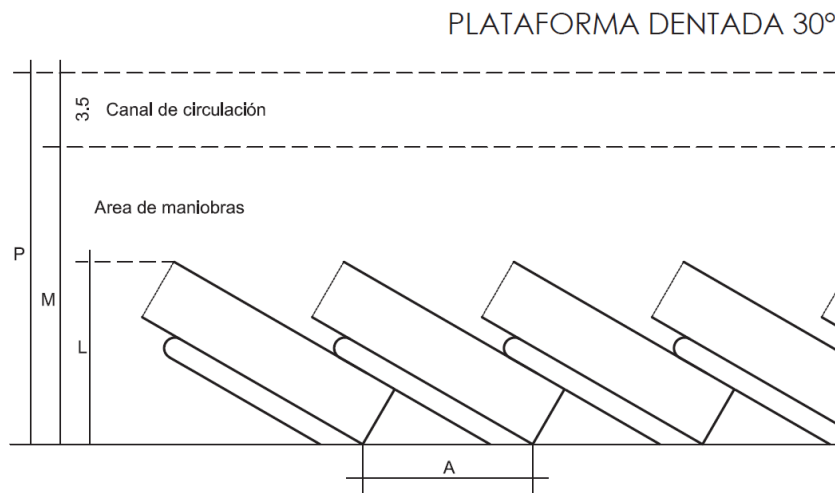


Figura 4.7: Esquema dentado  $30^\circ$  [10]

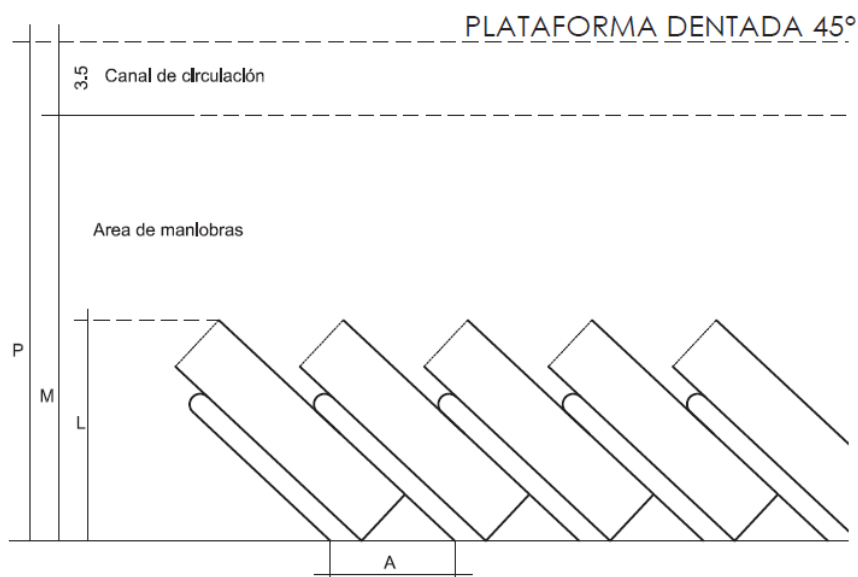


Figura 4.8: Esquema dentado  $45^\circ$  [10]



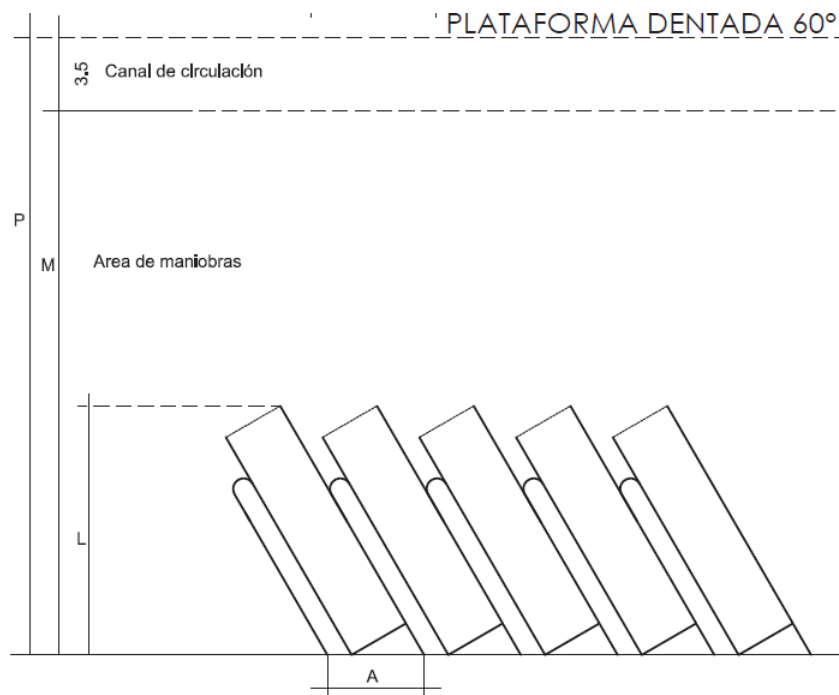


Figura 4.9: Esquema dentado 60° [10]

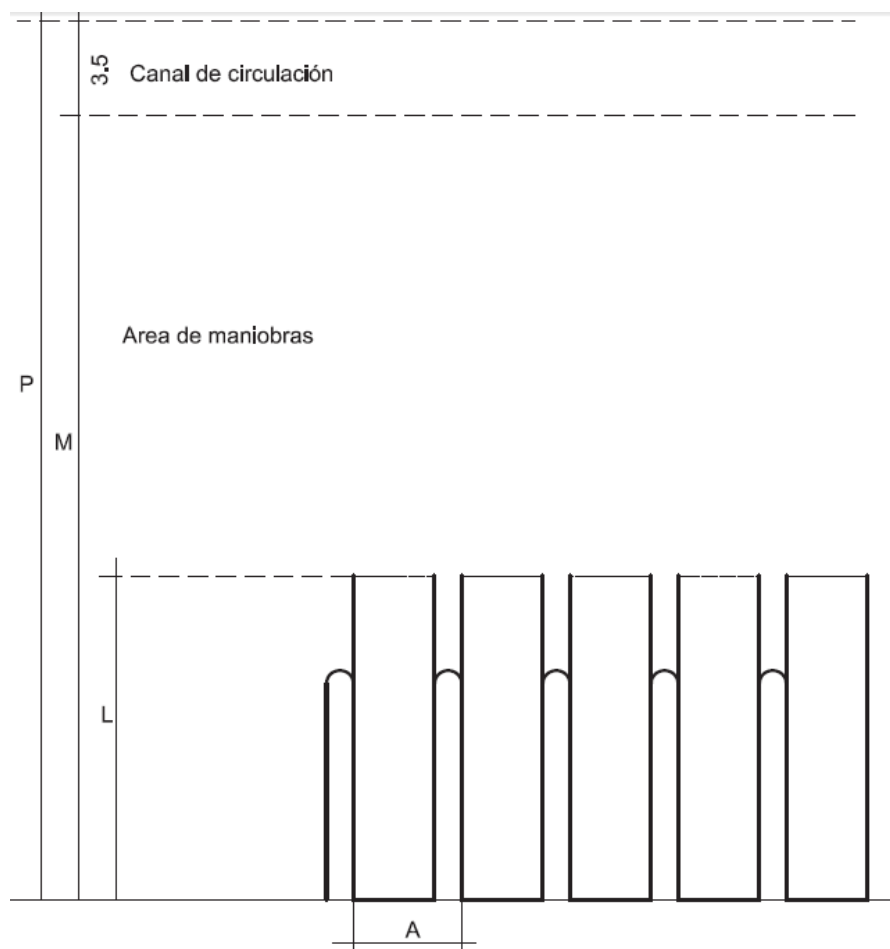


Figura 4.10: Esquema dentado 90° [10]

En función de estos esquemas y basándonos en la Tabla 4.2 se escoge aquella distribución que mejor se ajusta a nuestro caso particular:

**Tabla 4.2: Dimensiones según esquema [10]**

	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>90°</b>
<b>A = Anchura(m)</b>	8.00	5.85	4.60	4.00
<b>P = Profundidad(m)</b>	17.50	23.50	29.50	34.00
<b>L = Longitud (m)</b>	8.80	11.00	12.50	12.80
<b>M = Maniobras (m)</b>	14.00	20.00	26.00	30.50
<b>AREA NETA POR BUS</b>	140.00	137.48	135.70	136.00

En base a estos esquemas y teniendo en cuenta que la distribución de dársenas será como se ha dicho anteriormente circular exterior, es preciso escoger uno de los dos primeros casos, ya que al ser en trayectoria circular exigirían mucho más espacio de maniobra del especificado en la tabla para 60 o 90 grados. Debido a esto y pensando en optimizar la superficie neta se escoge un esquema de 45 grados.

#### **4.3.2.2 Zona Peatonal**

Poco hay que decir de la zona peatonal en el “lado carretera”. Se ha dejado un corredor-pasillo de 4,6 m de anchura para que los peatones puedan caminar sin problema hasta encontrar el autobús correspondiente. De cualquier modo, los usuarios como se indicó anteriormente pueden moverse a través del vestíbulo interior de la estación y salir a su autobús por la puerta más cercana. Además, en esta zona exterior se colocarán diversos asientos distribuidos a lo largo de todo el muro cortina que será la separación física entre esta zona de dársenas y el vestíbulo interior de la estación.

Se decide colocar un muro cortina en este ala Oeste de la terminal de tal manera que los usuarios puedan ver desde el vestíbulo la llegada y salida de todos los autobuses sin necesidad de salir al exterior.

#### **4.3.2.3 Zona de rodadura**

A partir de los valores obtenidos de la Tabla 4.2, la zona de rodadura queda definida completamente. La separación mínima entre dos dársenas consecutivas es de 5.85 m, la longitud destinada a cada autobús será al menos de 11 m, la zona de maniobras tendrá un radio mínimo de 18.5 m medido desde el comienzo de la dársena y el radio más amplio dentro del cual se incluye el carril de rodadura será de al menos 23.5 m medido desde el mismo punto de la dársena que el anterior.

El resto de la zona de circulación alrededor de todo el recinto de la estación vendrá definido por el carril de circulación con un arcén en la parte exterior y espacio en la interior para el estacionamiento de autobuses que no

fueran a realizar un servicio en ese momento.

### 4.3.3 Aparcamiento

Se entiende imprescindible hoy en día un aparcamiento de vehículos en una terminal de transporte. En este caso se debe dimensionar el tamaño de dicho parking de igual manera que se hizo con el número de dársenas, es decir para la demanda del día de mayor conflicto del año.

En este aparcamiento, se tendrá en cuenta que se puede acceder a la terminal desde diferentes medios, como son coches, motocicletas y bicicletas principalmente, a parte de a pie.

#### 4.3.3.1 Aparcamiento vehículos motorizados

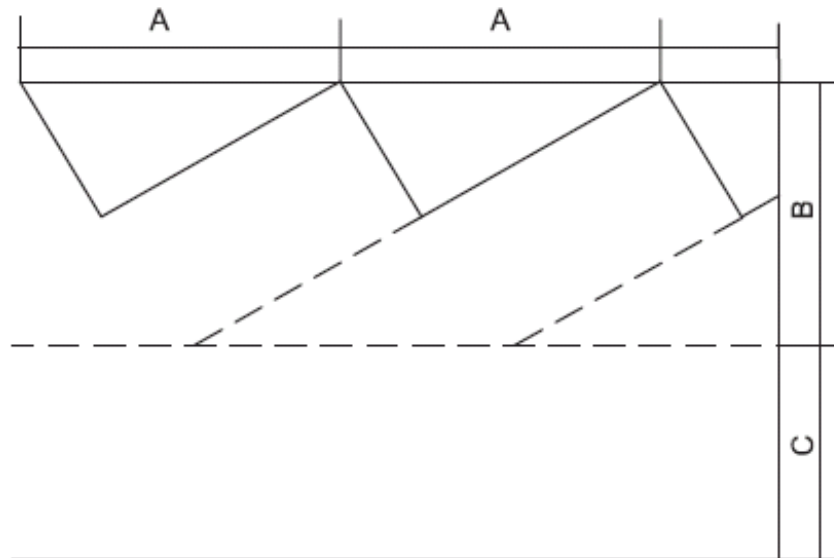
El número de usuarios que se estima van a viajar esa hora punta es de 109, y según estudios similares para estaciones de autobuses se estima que en torno al 70% de estos llega o se marcha en un vehículo, ya sea de su propiedad, de la de un familiar o en un taxi.

Por ello, el número mínimo de plazas de aparcamiento a situar es de 77. Además se deben reservar en torno a un 10% de plazas de esa demanda a taxis, es decir, 10 plazas más. Por otro lado se prevé que en la estación trabajarán unas 20 personas, por lo que se añaden 25 plazas más. Además se reservará espacio para aparcar 20 motocicletas, que se traducen en 7 plazas de coche más. En total el aparcamiento deberá contar con al menos 120 plazas de aparcamiento.

Para dimensionarlo, se tienen en cuenta los siguientes esquemas:

- Esquema dentado a 30° y 45° (Figura 4.11).
- Esquema dentado a 60° y 90° (Figura 4.12).

ESTACIONAMIENTO DENTADA 30°



ESTACIONAMIENTO DENTADA 45°

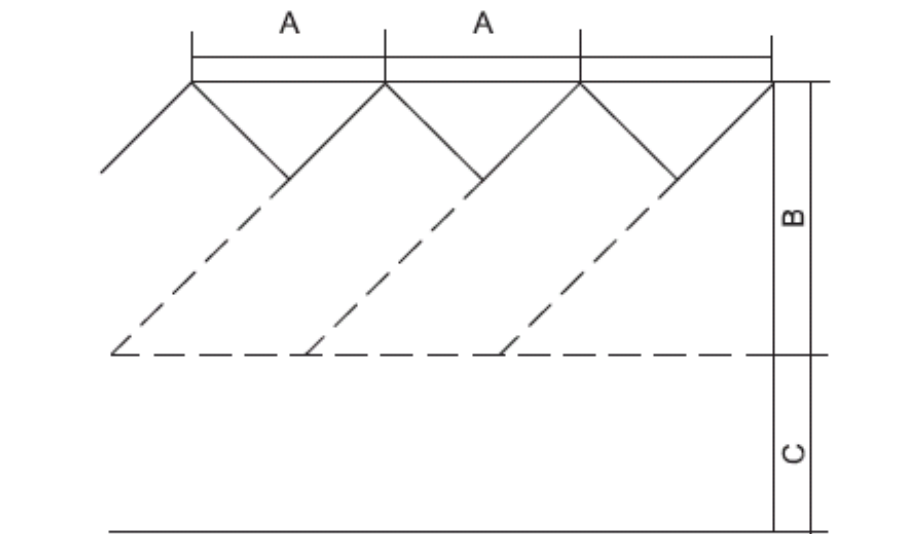


Figura 4.11: Esquema estacionamientos dentados 30° y 45° [10]

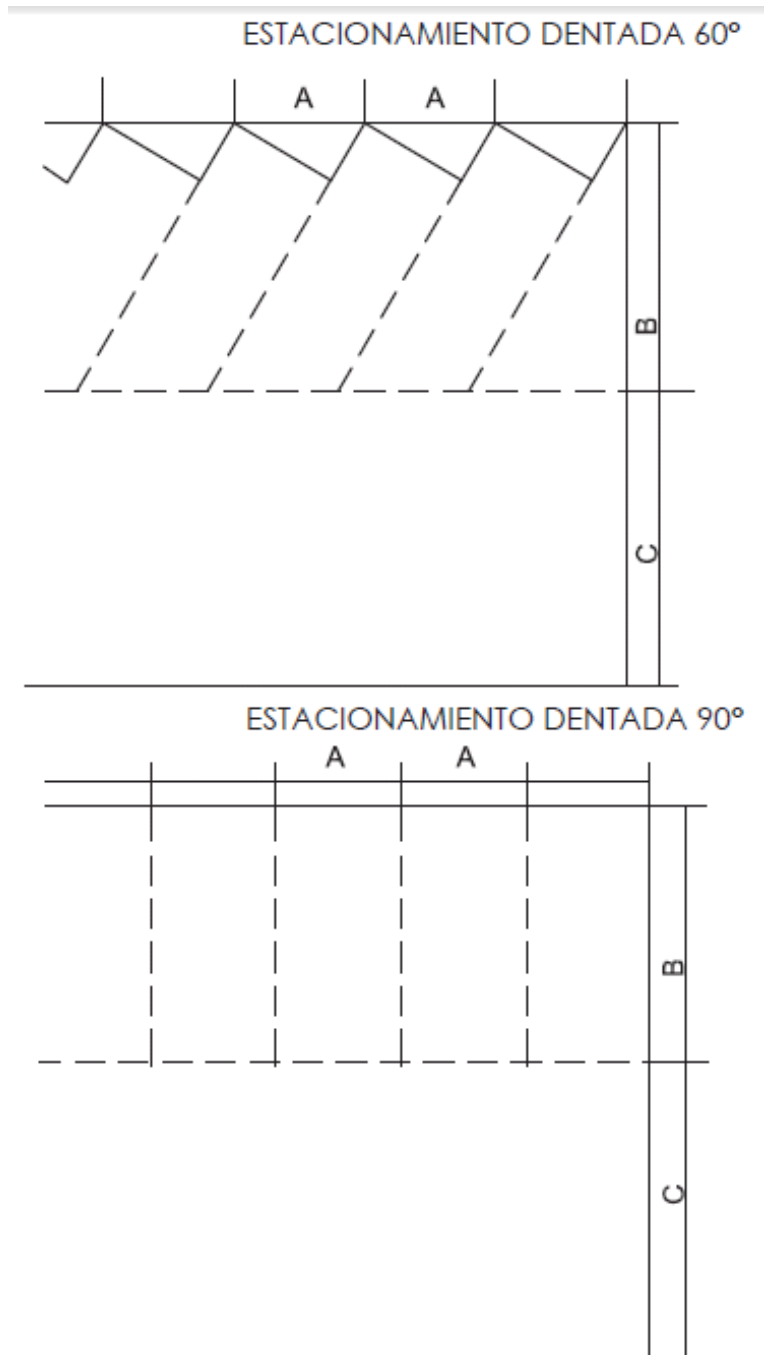


Figura 4.12: Esquema estacionamiento dentado 60° y 90° [10]

La Tabla 4.3 muestra las dimensiones asociadas a cada una de estos esquemas de estacionamiento.

Tabla 4.3: Dimensiones según esquemas de estacionamientos [10]

	A(m)	B(m)	C(m)	AREA
en 45°	3,40	5,00	3,30	28,20 M <sup>2</sup> .
en 30°	5,00	4,30	3,30	34,00 M <sup>2</sup> .
en 60°	2,75	5,50	6,00	28,00 M <sup>2</sup> .
en 90°	2,50	5,20	6,00	28,00 M <sup>2</sup> .

Se observa que tres de ellos coinciden en optimización de superficie ya que al final todos excepto a 30 grados necesitan la misma superficie. Se elige una disposición a 90 grados para el aparcamiento de vehículos.

#### 4.3.3.2 Aparcamiento bicicletas

En este caso, no se realizarán cálculo para conocer cuántas plazas para aparcamiento de bicicletas se debe reservar, se proporcionaran 20 plazas enfrentadas a la fachada Oeste del edificio, a la izquierda de la puerta principal de entrada. El esquema para conocer las dimensiones de este tipo de aparcamiento será el mostrado en la Figura 4.13.

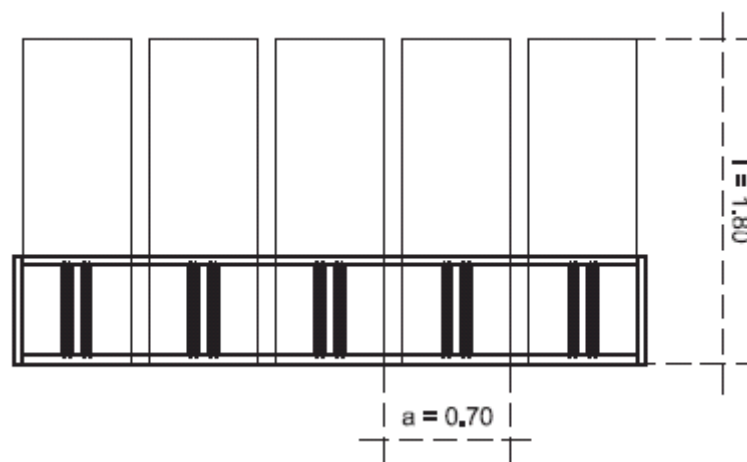


Figura 4.13: Dimensiones estacionamiento de bicicletas

#### 4.3.3.3 Jardines

Se dedica un área a jardines en el espacio comprendido entre la entrada principal a la estación y el aparcamiento de vehículos de los usuarios con la finalidad de darle un aspecto más natural y cercano al usuario, también haciendo que la estación se encuentre mejor encuadrada con el medio que la rodea. Para el dimensionamiento de los mismos no se realiza ningún cálculo, si no que se utiliza el mayor espacio posible a este fin dejando libre las zonas de circulación de personas a pie.

#### 4.3.3.4 Cabina de control

Se dedica una cabina de control de 8 m<sup>2</sup> para el control del acceso al

aparcamiento de vehículos. En este caso, se atribuye esta superficie para que se ubique en la misma un operario de control de accesos.

#### 4.3.4 Atención al usuario

Se deben dimensionar también una serie de áreas destinadas a atender a todos los usuarios de la terminal. Estas áreas son muy variadas en función del tipo de servicio que ofrecen: A continuación se describen las diferentes áreas y servicios.

##### 4.3.4.1 Vestíbulo general estación

El vestíbulo general de la estación tiene tres funciones principales:

- Albergar las zonas de cafetería y oficinas.
- Servir de estancia de espera para los usuarios.
- Espacio para la movilidad de los usuarios en el interior de la terminal de tal forma que permita una fluidez de personas hasta los diferentes servicios de los que dispone la estación.

El primero de los puntos se tendrá en cuenta en función del dimensionamiento que se haga de cada una de ellas más adelante.

En cuanto al dimensionamiento de las estancias de espera, también se deberá hacer para el día de mayor demanda de la terminal, pero además teniendo en cuenta se estima que de media por cada usuario que viaja hay otro usuario que no viaja con él que le acompaña a la estación [7]. Para dimensionarlo se tiene el esquema de la Figura 4.14.

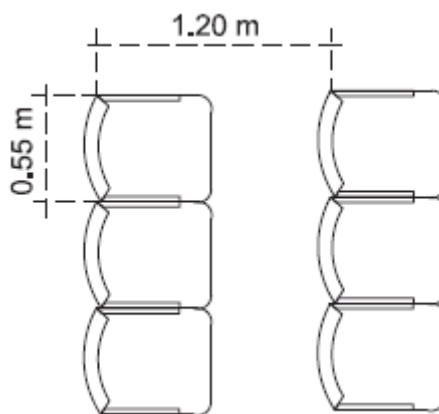


Figura 4.14: Esquema dimensiones estancia de espera [10]

Como se puede ver, el área por persona será de  $0,66 \text{ m}^2$ . El área correspondiente para los 109 usuarios de la hora punta del día previsto con mayor demanda viene dada por la siguiente expresión, teniendo en cuenta que del total solo el 70% buscará tomar asiento [7]:

$$\text{Superficie espera} = 109 \text{ personas} \cdot 2 \cdot \frac{0,66 \text{ m}^2}{\text{persona}} \cdot 0.7 = 100 \text{ m}^2$$

Este valor es orientativo y hay que tomarlo como un mínimo que nunca se debe sobrepasar, pero el tamaño real de las zonas de espera deberá ser mayor para dar una sensación espaciosa al usuario y evitar de este modo situaciones de agobio, molestias e interferencias con otros usuarios. Por ello se va a calcular también el número mínimo de asientos necesarios para que los usuarios puedan esperar en una posición de alta comodidad a la salida o llegada del vehículo correspondiente. La expresión para obtenerlo es:

$$\text{Número asientos} = 1 \frac{\text{asiento}}{\text{persona}} \cdot (2 \cdot 109) \text{ personas} \cdot 0.7 = 150 \text{ asientos}$$

Este indicador también se tendrá en cuenta como un valor mínimo que nunca se debe sobrepasar, ya que se busca siempre una buena calidad de servicio.

Para dimensionar el vestíbulo principal como un pasillo de distribución de usuarios se debe tener en cuenta una serie de parámetros importantes para la movilidad a pie de los usuarios.

La capacidad de los pasillos de conexión o distribución se rige por los siguientes factores: velocidad al andar del usuario, densidad de usuarios y anchura del pasillo.

El rango de variación en la velocidad de un peatón es amplio y depende de diversos factores. Además de factores como el sexo y la edad, la velocidad varía según el momento del día, la temperatura, la composición de los usuarios y el motivo del viaje. La velocidad de un peatón típica de diseño es 83 m/min.

El factor que aparentemente influye más en la velocidad de los usuarios es la densidad de peatones. Cualquier desplazamiento de un peatón requiere suficiente espacio para caminar a su ritmo, reconocer posibles obstáculos y evitarlos. El espacio medio por usuario para la velocidad indicada como típica de diseño, se corresponde con una superficie media de 4,5 m<sup>2</sup>/usuario aproximadamente para un nivel de servicio alto, aunque para la mayor calidad de servicio estudiada este valor es de 12 m<sup>2</sup>/usuario.

En cuanto al último factor que afecta directamente a los desplazamientos por pasillos, se ha comprobado que los usuarios mantienen una distancia de seguridad hasta las paredes de 0,4 m, por lo que el ancho efectivo debe computarse como el real menos 1 m aproximadamente.

Además se tiene en cuenta que la intensidad de usuarios que se busca conseguir es de 10 peatones/ (m·min), que es la considerada para un nivel de



servicio muy alto.

En este punto se debe hacer una estimación. Si se supone que entran en conflicto de movilidad para el minuto de estudio de la hora de diseño el 30% del total de usuarios de esa hora punta, se tiene que circularán 66 usuarios. Con lo que se va a calcular la superficie por peatón que es necesaria (siempre deberá estar dentro de los márgenes establecidos) y luego se obtendrá el área total mínima del pasillo para todos los usuarios que se esperan en la hora de mayor afluencia:

$$\text{Superficie necesaria} = \frac{\frac{83 \text{ m}}{\text{min}}}{\frac{10 \text{ usuarios}}{\text{m} \cdot \text{min}}} = \frac{8,3 \text{ m}^2}{\text{usuario}}$$

Se observa que el valor de superficie se encuentra dentro del rango comprendido entre los 4,5 m<sup>2</sup>/usuario, y los 12 m<sup>2</sup>/usuario. Con lo cual, manteniendo esos tres valores el nivel de servicio ofrecido al usuario es de muy alta calidad. La superficie mínima que ha de tener el pasillo será:

$$\text{Superficie pasillo} = 8,3 \frac{\text{m}^2}{\text{peatón}} \cdot 66 \text{ peatones} = 548 \text{ m}^2$$

#### 4.3.4.2 Taquillas venta de tickets

En la estación actual están trabajando cinco compañías distintas, además de esto se crearán taquillas para otras cuatro compañías más, ya que se trata de un sector muy cambiante y las rutas que hoy lleva una empresa el día de mañana las puede llevar otra o varias.

El tamaño de cada taquilla se estima en función de cuantas personas trabajarán en ellas, para el caso de dos personas trabajando en cada taquilla, que es lo que se plantea, cada taquilla deberá tener 10 m<sup>2</sup> de superficie.

#### 4.3.4.3 Tiendas

En muchos casos las terminales de transporte contienen entre sus servicios los locales comerciales. Típicos suelen ser los de artículos para la lectura como periódicos o revistas, aperitivos, recuerdos de la estancia en la ciudad, farmacia, alquiler de vehículos, etc. El mínimo espacio establecido para locales de estas características es el comprendido en un área de 2,7 m x3 m, es decir 8,1 m<sup>2</sup>.

#### 4.3.4.4 Consigna

En un estudio realizado en las principales estaciones de autobuses en ciudades de menos de 50.000 habitantes [11], se estima que menos del 10% de usuarios utilizan este servicio. Si se calcula para el día de diseño, suponiendo que todos almacenan su equipaje durante todo el día, quedando el

análisis de este modo del lado de la seguridad en el caso de que no fuera así, 88 personas almacenarían su equipaje.

El servicio de consigna en terminales de autobuses suele ser de funcionamiento autónomo para el usuario, eso sí pagando la tarifa correspondiente en función del tiempo que va a almacenar su equipaje, por lo que en la estación habrá un encargado de este servicio. Esta persona necesitará un espacio de al menos  $5 \text{ m}^2$  para desarrollar sus funciones.

En promedio cada usuario traslada un volumen de equipaje en torno a las medidas de 65 cm largo, 50 cm ancho y 30 cm alto. El espacio destinado a cada uno de estos equipajes en planta es de  $0,7 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ , es decir,  $0,35 \text{ m}^2$  y suele ir colocado en 2 pisos de altura de taquillas de almacenamiento. Por lo que la superficie necesaria en consigna será al menos de:

$$\begin{aligned} \text{Superficie consigna} &= \text{superficie oficina} + \text{superficie almacén} \\ &= 5 \text{ m}^2 + \frac{88 \text{ usuarios} \cdot 0,35 \frac{\text{m}^2}{\text{usuario}}}{2} = 20,4 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

#### 4.3.4.5 Aseos femeninos

La cantidad necesaria de baterías sanitarias para las instalaciones, es de 1 por cada 20 usuarios [10], se sabe que como máximo en la terminal habrá 218 usuarios (incluyendo acompañantes) simultáneamente en la hora de diseño, lo que daría un total de 10 baterías sanitarias 5 para cada uno de los sexos. Además, en cumplimiento de la ley actual, al menos uno de estos sanitarios debe estar adaptado a personas con movilidad reducida, en este caso se adapta un sanitario de cada uno de los aseos

Se debe tener en cuenta que las superficies necesarias para inodoros y lavabos vienen dadas por el esquema mostrado en la Figura 4.15.

Se observa en él que cada batería sanitaria, inodoro más lavamanos, ocupan un total de superficie de  $2,97 \text{ m}^2$ , con lo que el total de la superficie destinada a aseos femeninos será de como mínimo  $15 \text{ m}^2$ . En cualquier caso se dedica una superficie superior para de esta forma dar mayor comodidad a los usuarios que vayan a utilizarlos, siempre buscando el mayor confort posible en las instalaciones diseñadas.

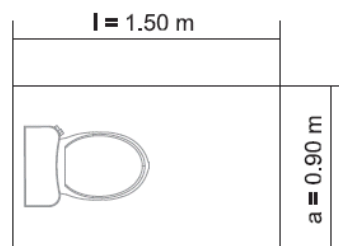
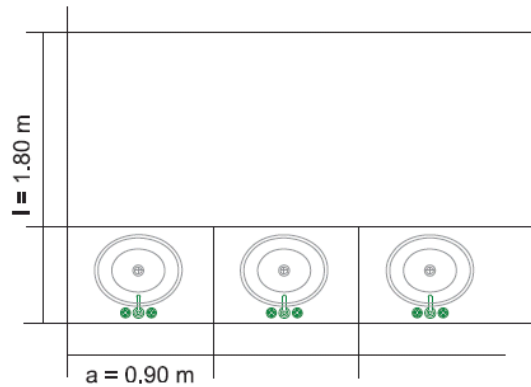


Figura 4.15: Esquema dimensionamiento aseos [10]

#### 4.3.4.6 Aseos masculinos

Su dimensionamiento es similar al descrito en el apartado 4.3.4.5.

El cuarto de limpieza es un caso particular, ya que no existen unas dimensiones estándar para este tipo de recintos. Se escoge un tamaño considerado oportuno para los utensilios que se esperan almacenar en ese lugar. En el caso del cuarto de limpieza de la estación en general, se diseña teniendo en mente que puede que haya que guardar en este cuarto una máquina de barrido automático o de pulido de suelos.

#### 4.3.5 Cafetería restaurante

La cafetería irá ligada a un servicio de restaurante, hoy en día toda terminal de transporte contiene y realiza este tipo de servicios ya que cubre una de las necesidades básicas del ser humano.

##### 4.3.5.1 Vestíbulo cafetería

Se entiende como vestíbulo la zona de la cafetería situada en la zona más cercana a la puerta de la misma, por motivos de seguridad se debe dejar al menos 1,5 veces el ancho de la puerta en cualquier dirección de la misma libre de cualquier tipo de obstáculo que pudiera interferir en la movilidad de las personas.

##### 4.3.5.2 Cafetería

La idea es colocar en la zona de cafetería al menos 8 mesas para cuatro

personas además de la superficie aportada por la barra. Para calcular esta superficie se toma como base el esquema mostrado en la Figura 4.16.

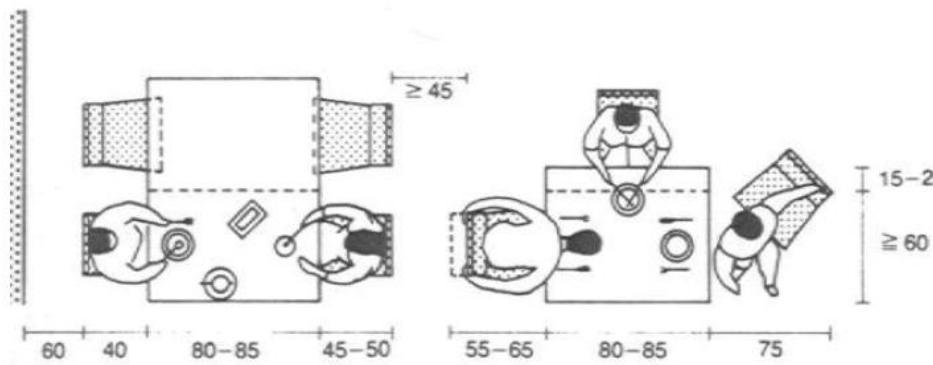


Figura 4.16: Esquema dimensionamiento mesas restauración [10]

Como se observa, para las mesas de cuatro personas, es decir, el esquema de la izquierda, y teniendo una separación del resto de elementos de 60 cm, la superficie para cada una de las mesas será:

$$\text{Superficie mesa} = 2,8 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m} = 6,72 \text{ m}^2$$

Con lo que la superficie mínima de la zona de cafetería será de:

$$\text{Superficie cafetería} = 6,72 \text{ m}^2 \cdot 8 = 53,76 \text{ m}^2$$

#### 4.3.5.3 Comedor

Para el comedor del restaurante se usa la misma técnica de cálculo que en el apartado 4.3.5.2. Se desea dar servicio al mismo número de mesas, con lo que la superficie mínima que deberá tener el comedor será igualmente de  $53,76 \text{ m}^2$ .

#### 4.3.5.4 Cocina

Tan importante para dar un buen servicio de restauración es la superficie destinada a la zona de restaurante y cafetería como la destinada a la cocina, que es donde se realiza el verdadero trabajo. Por ello, teniendo en cuenta cámaras y almacenes, el tamaño de la misma debe ser al menos el 50% del total destinado a dar servicio en mesas, por lo que:

$$\text{Superficie total cocina} = \frac{107,52 \text{ m}^2}{2} = 53,76 \text{ m}^2$$

Pero a esta superficie se le debe quitar la destinada al almacén ya que serán espacios separados, la superficie destinada a almacén se debe considerar como el 25% del total de la cocina, con lo que:

$$\text{Superficie almacén} = \frac{53,76 \text{ m}^2}{4} = 13,44 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie cocina} = 53,76 \text{ m}^2 - 13,44 \text{ m}^2 = 40,32 \text{ m}^2$$

#### 4.3.5.5 Almacén cafetería

Como se ha calculado en el apartado anterior, la superficie de almacén es de 13,44 m<sup>2</sup>.

#### 4.3.5.6 Cuarto de limpieza

No es un cuarto para el que se tengan referencias, por lo que simplemente se le aportará una superficie que se considere oportuna en base a experiencia con cuartos similares.

#### 4.3.5.7 Aseo femenino

Para el dimensionamiento de los aseos de la cafetería se utilizan los mismo esquemas de tamaño de sanitarios usados para el caso de los aseos públicos de la estación. Pero, en este caso, se tiene en cuenta que el número de personas simultáneamente que lo utilizarán será mucho más reducido, en concreto para 60 personas en el momento de mayor demanda. Por lo que teniendo en cuenta que se aplicaba la regla de 1 sanitario por cada 20 usuarios, serán necesarios 3. Para repartir de forma equitativa entre los dos sexos se colocan dos en cada uno de los aseos.

En este caso, solo se adaptará uno de los aseos a personas con movilidad reducida, y será el femenino, por lo que se le otorgará la superficie extra necesaria para albergar uno de sus aseos con las características adecuadas.

#### 4.3.5.8 Aseo masculino

Como se ha indicado en el apartado anterior se colocarán 2 sanitarios con las dimensiones que se establecieron en el dimensionamiento de los aseos públicos de la estación.

#### 4.3.6 Oficinas

Se trata de las dependencias destinadas a responsables, coordinadores, controladores y trabajadores de la terminal.

Para dimensionar cada una de estas superficies se tiene en cuenta lo especificado en la Tabla 4.4, que hace referencia a las dimensiones netas para recintos de oficinas.

Tabla 4.4: Valores típicos de superficie neta para zonas de oficina [29]

1.- DIMENSIONES NETAS MÁXIMAS PARA RECINTOS OFICINAS:		
ESTAMENTO	SUPERFICIE NETA [M2]	OBSERVACIONES
MINISTRO - SUBSECRETARIO	40	INCLUYE BAÑO, ESTAR Y MESA DE REUNION
JEFE DE SERVICIO [2]	24	INCLUYE BAÑO, ESTAR Y MESA DE REUNION
DIRECTIVO (TIPO A) [3]	18	INCLUYE BAÑO Y MESA DE REUNIÓN
DIRECTIVO (TIPO B) [4]	12	OFICINA CERRADA SIN BAÑO
PROFESIONAL (JEFATURA)	12	OFICINA CERRADA SIN BAÑO
PROFESIONAL (RECINTO INDIVIDUAL)	9	OFICINA CERRADA SIN BAÑO
PROFESIONAL (RECINTO COMPARTIDO O EN PLANTA LIBRE)	7,5	ESTACIÓN DE TRABAJO
TECNICO O ADMINISTRATIVO, SECRETARIA SIN ESPERA, AUXILIAR - CHOFE.	4	ESTACIÓN DE TRABAJO
SECRETARIA CON ESPERA	13	CON ESPERA PARA 3 PERSONAS
2.- DIMENSIONES NETAS MÁXIMAS PARA RECINTOS COMPLEMENTARIOS:		
RECINTO	SUPERFICIE NETA [M2]	OBSERVACIONES
SALA DE REUNIONES [5]	VER CUADRO ANEXO N°1	MÁXIMO DE SUPERFICIE NETA EQUIVALENTE A LA INDICADA EN CUADRO.
BAÑOS	2	RECINTO INDIVIDUAL SEGÚN CUADRO ANEXO N°2
KITCHENETTE	4	1 CADA 500 M2 POR CADA PISO SUPERIOR A 300 M2.
ARCHIVOS Y BODEGAS DIARIOS	3% DE LA SUPERFICIE NETA TOTAL DE RECINTOS DE OFICINAS	
SALA INFORMÁTICA - DATA CENTER	1% DE LA SUPERFICIE NETA TOTAL DE RECINTOS DE OFICINAS	CON UN MÁXIMO DE 25 M2.

Además se debe aplicar en torno a un factor de corrección del 30% para tener en cuenta zonas de paso en cada una de las estancias [29].

#### 4.3.6.1 Oficina 1

Se considera tanto la oficina 1 como la oficina 2 como oficina profesional (recinto compartido), con lo que su superficie para cada trabajador será de 7,5 m<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta que se espera que trabajen 3 personas en cada una de las oficinas, y contando con el factor de corrección del 30%, su superficie será:

$$\text{Superficie oficina 1} = 7,5 \frac{\text{m}^2}{\text{usuario}} \cdot 3 \text{ usuarios} \cdot 1,3 = 29,25 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6.2 Oficina 2

Igual que en el apartado anterior y dimensionándolo para el mismo número de personas:

$$\text{Superficie oficina 2} = 7,5 \frac{\text{m}^2}{\text{usuario}} \cdot 3 \text{ usuarios} \cdot 1,3 = 29,25 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6.3 Sala reuniones

En el caso de la sala de reuniones se debe tomar como referencia la Tabla 4.5, referente a salas de reuniones.

Tabla 4.5: Cuadro dimensionado sala de reuniones [29]

CUADRO ANEXO N°1 - SALA DE REUNIONES	
1.- DEFINICIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO:	
DOTACIÓN FUNCIONARIA (N°)	SUPERFICIE NETA (M2)
HASTA 20 PERSONAS	12
SOBRE 20 PERSONAS	Dotación Funcionaria X 0,6 M2
2.- DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD:	
TASA DE OCUPACIÓN:	1,1 M2/Persona

En este caso se trata de una sala de reuniones de hasta 20 personas. Su superficie viene dada por:

$$\text{Superficie sala reuniones} = 12 \text{ m}^2 \cdot 1,3 = 15,6 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6.4 Despacho Jefe Estación

De igual manera y siguiendo las indicaciones de la Tabla 4.4, en el apartado de jefe de servicio, se otorga un área de 24 m<sup>2</sup>, que en este caso no será con baño privado para el despacho.

#### 4.3.6.5 Sala control

Para la sala de control el cálculo es similar al de las oficinas 1 y 2, pero en este caso se espera que en la sala de control de accesos y salidas de autobuses trabajen solamente dos personas y no tres, con lo que la superficie de esta sala viene dada por:

$$\text{Superficie sala control} = 7,5 \frac{\text{m}^2}{\text{usuario}} \cdot 2 \text{ usuarios} \cdot 1,3 = 19,5 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6.6 Oficina Diputación de Burgos

En terminales de transporte es típico contar con un espacio en la zona de oficinas para la posible llegada de empleados de la diputación de burgos que quieran realizar análisis y estudios sobre el tráfico, nivel de servicio, calidad en el transporte, etc. Igual que en el caso anterior, se dimensiona la oficina para que puedan trabajar al menos dos personas en su interior.

$$\text{Superficie O. Diputación Burgos} = 7,5 \frac{\text{m}^2}{\text{usuario}} \cdot 2 \text{ usuarios} \cdot 1,3 = 19,5 \text{ m}^2$$

#### 4.3.6.7 Sala conductores

En este caso no es una oficina o una estancia de trabajo la que se está dimensionando, sino una sala de estar de ocio y esparcimiento. Pero para dimensionar la estancia se usa el mismo criterio que en el caso de una oficina, eliminando el factor de corrección para las zonas de paso:



$$\text{Superficie sala conductores} = \frac{m^2}{\text{usuario}} \cdot 6 \text{ usuarios} = 45 m^2$$

#### 4.3.6.8 Aseos masculinos

El dimensionamiento de los aseos masculinos es similar al realizado para aseos de otras estancias, se estima que en algunos momentos pueda haber un total de 25 personas simultáneamente trabajando en el recinto de oficinas, con lo que con un único sanitario para cada uno de los baños podría ser suficiente ya que la estimación es de 1 por cada 20 usuarios, para evitar esperas innecesarias se colocan dos en cada uno de los aseos.

#### 4.3.6.9 Aseos femeninos

Como se ha comentado en el apartado anterior se colocarán dos sanitarios en el aseo femenino. En este caso, teniendo en cuenta que se debe adaptar uno de ellos para personas con movilidad reducida en el aseo femenino.

#### 4.3.6.10 Cuarto limpieza

No es un cuarto para el que existan referencias por lo que simplemente se le asigna una superficie que se considere oportuna en base a experiencia con cuartos similares.



## **5 DESCRIPCIÓN Y DIMENSIONES DEL DISEÑO DEFINITIVO**

En este capítulo se describe brevemente cada una de las áreas dimensionadas anteriormente. No se describen en detalle ya que no es el objetivo de este proyecto el cálculo de la estructura ni tampoco el de un presupuesto de la terminal, si no la funcionalidad de la misma de cara al transporte de viajeros y a la movilidad de los mismos en la terminal, se explican de este modo el diseño finalmente escogido, tamaños definitivos, materiales utilizados, etc.

Cabe remitirnos a los planos contenidos en el Anexo 1 para la identificación de las zonas descritas y dimensionadas en este capítulo.

Se analiza por partes, comenzando por lo más grande y describiendo después las partes más pequeñas.

### 5.1 Muro perimetral

La nueva terminal irá ubicada en el mismo lugar que la anterior, pero se debe edificar también en parcelas colindantes ya que ocupará una superficie total algo mayor.

La zona edificada va a ser rectangular, dando uno de los lados cortos del mismo a la Avenida de Valladolid, y colocándose en el lado opuesto un semicírculo que será la zona de dársenas de la estación. Por ello, la entrada principal al recinto queda en el lado de la Avenida de Valladolid, dando al Este.

Todo el recinto irá bordeado por un muro perimetral de 4 metros de altura hecho con bloque de hormigón prefabricado de color tierra. Además se separan con bloque similar la zona de circulación de autobuses con la zona de aparcamiento de vehículos con un muro de 2,5 m de altura, tanto por la zona Norte como por la zona Sur.

El lado corto del rectángulo formado por el muro perimetral mide 100 m y el largo mide 166 m. Con lo que el área ocupada por la nueva terminal en la parcela será de 16600 m<sup>2</sup>. Algo mayor que la ocupada por la anterior.

El muro perimetral tendrá cinco puertas de un tamaño suficiente para acceder con vehículos, y 2 más pequeñas en el muro Este para el acceso de peatones a pie.

De las cinco puertas para vehículos, una es utilizada para el acceso de vehículos de usuarios al parking en el centro del muro perimetral del lado Avenida de Valladolid en la zona Este, y es de 10 m de ancho. También van dos puertas ubicadas en esa misma zona para el acceso y salida de los autobuses desde la Avenida de Valladolid, estas dos puertas están colocadas próximas a los muros perimetrales Norte y Sur, por la Sur se dará la entrada de autobuses y por la Norte la salida, creando así el sentido único de circulación

de autobuses en el interior de la terminal en sentido horario. Estas puertas son de 12 m de ancho.

De las dos puertas para vehículos restantes, una se coloca en el muro perimetral Norte y la otra en el Sur, a la altura del comienzo de la zona de dársenas. Estas puertas no estarán abiertas de manera usual, solamente en momentos de evacuación por algún tipo de emergencia, tienen una anchura de 5 m cada una.

Las dos puertas para peatones se ubican para el acceso de los mismos a pie desde la avenida de Valladolid, haciendo coincidir dichas puertas con los pasos de peatones interiores en el aparcamiento, de tal manera que los flujos de peatones y vehículos interfieran lo menos posible. Estas puertas tienen un ancho de 1,10 m cada una.

## 5.2 Áreas y servicios distinguibles en la terminal

### 5.2.1 Pavimento circulación autobuses

El pavimento de circulación de autobuses es un pavimento continuo exterior de hormigón armado fabricado en central y vertido con camión, de 15 cm de espesor, sobre una capa base existente, armado con malla electrosoldada, y capa de rodadura de mortero de cemento con acabado fratasado mecánico para la buena circulación de los autobuses.

### 5.2.2 Zona Dársenas

Como se indica en el dimensionado del capítulo 4 de la terminal, se ubican 10 dársenas y su distribución es circular externa, más concretamente semicircular externa. Este área de la estación está cubierto por una marquesina a 5,5 m de altura en su zona exterior y 8 m de altura en su zona interior, la cual cubre toda la superficie comprendida entre el edificio terminal y la parte trasera de los autobuses estacionados en sus dársenas. Se trata de un anillo semicircular de 38 m de radio exterior y 22 m de radio interior en contacto con el edificio terminal. La marquesina circular tendrá forma ondulada a lo largo de todo el anillo semicircular.

La estructura de la misma es metálica, formada por una celosía de vigas articuladas en la parte inferior y cubierta en la superior por un panel tipo sándwich de 5 cm de espesor y sobre este un tejado cerámico.

En cuanto al piso peatonal de este área, irá ubicado a la misma altura que el del interior de la terminal, y 15 cm por encima de la zona asfaltada destinada a la circulación de los autobuses. Solado de baldosas cerámicas de gres porcelánico para uso exterior, color negro metálico, con resistencia al deslizamiento.

### 5.2.3 Aparcamiento

El aparcamiento va pavimentado completamente, al mismo nivel y de la misma forma que el pavimento exterior de circulación autobuses. Su superficie es de 3675m<sup>2</sup>, y con marcas pintadas en el suelo para la buena colocación de los vehículos tal y como viene indicado en el plano 1 incluido en el Anexo1. Además también se pinta en el asfalto las zonas destinadas para la movilidad de las personas hasta el acceso a la terminal.

Todas estas plazas de aparcamiento van cubiertas por una marquesina que garantice el resguardo de los vehículos de las inclemencias meteorológicas.

#### 5.2.3.1 Jardines y área acceso

La superficie dedicada a jardines y acceso al edificio desde el aparcamiento es de 560 m<sup>2</sup>. Se pueden ver en los planos 1 y 2 incluidos en el Anexo 1 y se componen de un aporte de tierra vegetal y un abonado de fondo de terreno. Se realiza una instalación de riego automático. Se planta césped en toda su extensión y además se colocan también árboles.

El área no destinada a jardín va pavimentada de igual manera que el aparcamiento. Además en esta zona se ubica el aparcamiento de bicicletas que va señalizado con marcas en el suelo y una estructura metálica para ubicarlas.

#### 5.2.3.2 Cabina de control

La cabina de control tiene 4 m de altura en la pared trasera de la misma y 3 m en la pared opuesta generando así un tejado a un agua. Su construcción está formada por una hoja exterior de fachada ventilada de 1/2 pie de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico cara vista, con junta de 1 cm recibida con mortero bastardo de cal y cemento blanco. En el interior, se aplica un revestimiento decorativo con mortero industrial imitación de revoco tradicional, de 5 a 8 mm de espesor.

Tiene una ventana en la fachada Este de la cabina dando a la puerta de acceso de vehículos para poder facilitar el control de acceso y salida de los mismos. Esta ventana es de carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio simple, de 300 x100 cm, formada por tres paneles, con perfilaría provista de rotura de puente térmico.

Por debajo de la estructura metálica que conforma el techo de la cabina cerrado con panel sándwich de 5 cm de espesor, se coloca un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura.

La superficie ocupada por la misma es de 9,25 m<sup>2</sup>.

#### 5.2.4 Edificio terminal

El conjunto del edificio terminal cubre una superficie de unos 4340 m<sup>2</sup>.

##### 5.2.4.1 Solera

En toda la superficie de la terminal se aplica un aislamiento térmico horizontal de soleras en contacto con el terreno, colocado en la base de la solera, preparado para recibir una solera de mortero u hormigón.

La solera del edificio terminal es una solera continua de hormigón en masa fabricado en central y vertido desde camión, de 10 cm de espesor, extendido y vibrado manual con acabado de fratasado mecánico.

Después se añade una capa fina de pasta niveladora de suelos de 2 mm de espesor, aplicada manualmente, para regularización y nivelación de la superficie soporte interior que queda así preparada para recibir un solado de baldosas.

El solado de baldosas se compone de baldosas cerámicas de gres esmaltado color beige, recibido con mortero de cemento y rejuntado con mortero de juntas cementoso con resistencia elevada a la abrasión, para tener así una junta mínima con la misma tonalidad de las piezas.

El rodapié es también cerámico de gres esmaltado, de 7 cm de alto, recibido con adhesivo cementoso de uso exclusivo para interiores, beige y rejuntado también con mortero de juntas cementoso, para tener así también una junta mínima con la misma tonalidad de las piezas que forman el solado.

##### 5.2.4.2 Estructura

La estructura es de hormigón armado.

##### 5.2.4.3 Fachada

Todo el edificio de la terminal se construye siguiendo la misma configuración de fachada exceptuando el ala Oeste coincidente con la zona de dársenas. De forma general se construye a partir de una hoja exterior de cerramiento de fachada, de 1 pie de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico perforado (tosco), para revestir, con cámara de aire ventilada.

Por la parte exterior del edificio, es decir de cara al exterior el muro anteriormente descrito, va recubierto por una hoja exterior de fachada ventilada mediante plancha de acero con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica, de 2,0 mm de espesor, cortada a medida para colocar con fijaciones mecánicas, sujeta con anclajes puntuales.

Por la parte interior del edificio, va colocado un chapado de paramentos interiores, hasta 2,5 m de altura, con placas de mármol color crema perlado, con un acabado pulido, y rejuntado con mortero de juntas especial para

revestimientos de piedra natural, este chapado únicamente afecta a la pared donde se encuentra la puerta principal de entrada circular, ya que a lo largo del resto de la pared del edificio habrá otras dependencias que como mínimo llegarán a ocupar una altura de 3m. Por encima del chapado anterior, desde los 2,5m de altura hasta alcanzar la altura del muro cortina, es decir, hasta los 5,5 m de altura donde va ubicado el muro cortina perimetral, se cubre el muro de la fachada con un revestimiento decorativo en fachadas y paramentos interiores, con mortero industrial imitación de revoco tradicional de color beige.

Todo el muro Oeste de la estación con paredes rectas pero también circulares en la zona de dársenas, va realizado a partir de un muro cortina de aluminio mediante el sistema de fachada ventilada, con estructura portante; el cerramiento está compuesto de un 40% de superficie opaca (antepechos, cantos de forjado y falsos techos) y un 60% de superficie transparente fija realizada con luna templada de control solar, de 8 mm de espesor.

A excepción de la fachada formada por completo por un muro cortina, a lo largo del resto de fachada se distribuye una franja acristalada tipo muro cortina continuo similar al mencionado anteriormente, desde la altura de 5,5 m hasta los 7 m, es decir de 1,5 m de alto, para aportar iluminación natural al edificio. El medio metro restante hasta alcanzar la altura de cubierta será similar a lo descrito para la parte inmediatamente inferior a la franja acristalada, al igual que el metro y medio de parapeto superior asociado a la cubierta.

#### 5.2.4.4 Cubierta

La cubierta será una cubierta invertida situada a 7,5 m de altura, de tal manera que se aporte una visión mucho más estética al edificio. Dicha cubierta se describe a continuación.

En todo su contorno llevara un parapeto de 1,5 m de altura realizado de fábrica igual que la fachada, ya sea la fachada de fábrica o la de muro cortina, aplicando por los dos lados el revestimiento exterior asignado a la fachada en el exterior, en el caso de la fachada de fábrica.

Esta cubierta además aporta luz al interior ya que se crean dos lucernarios a cuatro aguas con una luz máxima de 6m revestido con placas alveolares color bronce traslúcido y 8 mm de espesor, situados en el eje de simetría longitudinal de la estación, una de ellas centrada en el centro del círculo que forma la fachada circular de panel sándwich y la otra a 5 m de la fachada Este de acceso.

La cubierta es una cubierta plana transitable, ventilada, con solado fijo, tipo convencional, pendiente del 1% al 5%, para tráfico peatonal privado.

Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con

placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 1m de altura.

#### 5.2.4.5 Accesos

La puerta principal a la terminal es una puerta circular giratoria transparente, con un radio de 3,15 m y una altura de 2,5 m, situada en la fachada Este de la estación. Además, existen otras 5 puertas de entrada y salida del edificio en la zona de dársenas, todas estas son puertas comunes de dos hojas. Todas las puertas son de características similares al muro cortina.

#### 5.2.4.6 Taquillas venta de tickets

Se ubican de forma circular diez taquillas de venta de billetes en torno al centro geométrico de la circunferencia de aparcamiento de autobuses ubicada en el ala Oeste del vestíbulo general del edificio, dejando una de ellas sin ocupar como pasillo de acceso a todas las demás.

La altura de este espacio es de tres metros, por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura y la superficie asignada a cada una de las oficinas es de 15,9 m<sup>2</sup>.

La construcción de dichas oficinas se realiza mediante una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de las oficinas es de mortero industrial imitación de revoco tradicional, de 5 a 8 mm de espesor, color beige. En el exterior se coloca un chapado de paramentos interiores, con placas de mármol color crema perlado, acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural. El techo está formado simplemente un falso techo de escayola.

Se ubican ventanas de atención al cliente en cada una de las oficinas desde una altura de 1,2 m hasta el techo de los mismos.

Sobre este espacio se ubican pantallas informativas sobre salida y llegada de autobuses, horarios y ocupación.

#### 5.2.4.7 Tiendas

Únicamente se describe la construcción de los dos espacios destinados a tiendas. Se realizan por medio de una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de las tiendas será de mortero industrial imitación de revoco tradicional, de 5 a 8 mm de espesor, color beige. En el exterior, en la zona no destinada a escaparate, se ubica un chapado de paramentos interiores, con placas de mármol en color crema perlado, acabado pulido y rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra



natural. La zona de escaparate está formada por de un cristal transparente de 2 cm de espesor.

La estructura para todas las áreas ubicadas en el interior del edificio de la terminal es metálica. Sobre todas estas áreas se realiza un forjado metálico a 3m de altura. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura. Sobre dichos forjados se deja un espacio a lo largo de todo el interior de la estación para la posible ubicación de espacios publicitarios.

La superficie total destinada finalmente a tiendas es de 48 m<sup>2</sup>. Las puertas de acceso a cada una de ellas son correderas automáticas de dos hojas de cristal transparente, al igual que el correspondiente al espacio de escaparate.

#### 5.2.4.8 Consigna

La estructura para todas las áreas ubicadas en el interior del edificio de la terminal es metálica. Sobre todas estas áreas se realiza un forjado metálico a 3m de altura. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura. Sobre dichos forjados se deja un espacio a lo largo de todo el interior de la estación para la posible ubicación de espacios publicitarios.

Por lo tanto, en este caso tanto los tabiques como el forjado son similares al caso de la zona de tiendas, solo que en este caso no existe espacio de escaparate.

Se ubica una ventanilla de atención al usuario y una puerta de acceso para los empleados de dicho servicio.

El área destinada al servicio de consigna es de 37 m<sup>2</sup>.

#### 5.2.4.9 Aseos femeninos

Finalmente la superficie ocupada por los aseos femeninos es de 30 m<sup>2</sup>. Como se explicó en el apartado 4.3.4.5 del Capítulo 4, se ubican cinco lavamanos y cinco urinarios, siendo uno de ellos adaptado para personas con movilidad reducida.

De igual manera que en el caso anterior la estructura para todas las áreas ubicadas en el interior del edificio de la terminal es metálica. Sobre todas estas áreas se realiza un forjado metálico a 3m de altura. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura. Además encima de los aseos sobre el forjado se ubicará el cuarto de calderas, que tendrá su acceso desde la fachada Sur con una escalera exterior.



Se forman los tabiques mediante una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de los aseos es alicatado con azulejo decorativo con las piezas dispuestas a cartabón, colocado sobre una superficie que actúa de soporte para los paramentos interiores, mediante mortero de cemento sin junta, color negro moteado. En el exterior se coloca un chapado de paramentos interiores, formado por placas de mármol de color crema perlado y con acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural. En el exterior va colocado de igual forma un chapado de paramentos interiores, con placas de mármol de color también crema perlado y con un acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural.

#### **5.2.4.10 Aseos masculinos**

Su diseño y ocupación es similar al de los aseos femeninos descritos en el apartado 5.2.4.9.

#### **5.2.4.11 Cuarto limpieza**

El cuarto de limpieza ocupa un área final de 25 m<sup>2</sup>. La estructura para todas las áreas ubicadas en el interior del edificio de la terminal es metálica. Sobre todas estas áreas se realiza un forjado metálico a 3m de altura. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura. Sobre dichos forjados se deja un espacio a lo largo de todo el interior de la estación para la posible ubicación de espacios publicitarios.

Se forma el tabique mediante una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de las tiendas será de mortero industrial imitación de revoco tradicional, de 5 a 8 mm de espesor, color beige. En el exterior se ubica un chapado de paramentos interiores, con placas de mármol con color crema perlado, con un acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural.

#### **5.2.5 Cafetería restaurante**

Toda la distribución de la zona de cafetería y restaurante se puede observar al igual que los demás en el plano 2 incluido en el Anexo1.

La superficie total destinada al área de restauración es de 490 m<sup>2</sup>. La cafetería está ubicada en la esquina Noreste del edificio, se cierra en el exterior con la fachada del edificio y en el interior con un tabique tipo muro cortina que comprende un cuarto de circunferencia con un radio de 25 m. En el trozo de tabique circular que coincide con el aseo femenino no se aplica tabique muro cortina, si no que se aplica un tabique por la parte que da al vestíbulo del

edificio, cubierto con un chapado de paramentos interiores hasta 2,5 m de altura, con placas de mármol de color crema perlado y con acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural. Este chapado únicamente afecta a la pared donde se encuentra la puerta principal de entrada a la terminal, ya que a lo largo del resto de la pared del edificio habrá otras dependencias que como mínimo llegarán a ocupar una altura de 3m. Por encima del chapado anterior, es decir desde los 2,5m de altura hasta el forjado de la cubierta invertida, se cubre el muro de la fachada con un revestimiento decorativo en fachadas y paramentos interiores, con mortero industrial imitación de revoco tradicional, color beige. Por la parte interior se describe en el apartado 5.2.5.7 y 5.2.5.8 el recubrimiento.

El muro cortina tiene una estructura de aluminio realizado mediante el sistema de fachada ventilada, con estructura portante. Su cerramiento está compuesto de un 40% de superficie opaca (cantos de forjado y falsos techos) y un 60% de superficie transparente fija realizada con luna templada de control solar, de 8 mm de espesor.

Todos los tabiques interiores a la zona de cafetería son ejecutados de la misma forma excepto en los aseos: se componen por una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento por ambos lados del tabique será de mortero industrial imitación de revoco tradicional, en color beige.

La altura del techo en la zona de cafetería se corresponde con el de la cubierta del edificio terminal. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 2 m de altura.

#### **5.2.5.1 Cafetería**

A la cafetería como tal (zona de estancia de usuarios), se aplica una superficie de 221 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

#### **5.2.5.2 Comedor**

El área de comedor es de 110 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

#### **5.2.5.3 Cocina**

El área de cocina es de 75 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

La cocina tiene tres ventanas, 2 dando a la fachada Norte y una a la fachada Este, todas ellas del mismo tamaño, quedando su parte inferior a 1,2 m de altura del suelo. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio,

anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

#### **5.2.5.4 Almacén cafetería**

El área de almacén es de 34 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

El almacén tiene una puerta que da a la zona de aparcamiento de vehículos de tal forma que se facilite el suministro de mercancías.

#### **5.2.5.5 Cuarto de limpieza**

El área del cuarto de limpieza es de 8 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

#### **5.2.5.6 Cuarto de basuras**

El área del cuarto de basuras es de 12 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

El cuarto de basuras tiene una puerta que da a la zona de aparcamiento de vehículos de tal forma que se facilite la retirada de las mismas.

#### **5.2.5.7 Aseo femenino**

Finalmente, la superficie ocupada por los aseos femeninos de la cafetería es de 16 m<sup>2</sup>. Como se calculó en el apartado 4.3.5.7 del Capítulo 4 se ubican dos lavamanos y dos retretes, siendo uno de ellos adaptado para personas con movilidad reducida.

Los tabiques que forman estas dependencias se componen de una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de los aseos se compone de un alicatado con azulejo decorativo con las piezas dispuestas a cartabón, colocado sobre una superficie que actúa de soporte, mediante mortero de cemento sin junta, siendo estos de color negro moteado. En el exterior se aplica un mortero industrial imitación de revoco tradicional, de color beige.

#### **5.2.5.8 Aseo masculino**

El área destinada a aseos masculinos es algo menor que femeninos ya que en este no se ubica ninguno adaptado a personas con movilidad reducida. Su superficie es de 13 m<sup>2</sup>.

### **5.2.6 Oficinas**

Toda la distribución de la zona de oficinas se puede apreciar en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

La estructura para todas las áreas ubicadas en el interior del edificio de

la terminal es metálica.

La superficie total destinada a oficinas es de 500 m<sup>2</sup>. Las oficinas están ubicadas en la esquina Sureste del edificio, se cierra en el exterior con la fachada del edificio y en el interior con una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento por el interior del tabique será de mortero industrial imitación de revoco tradicional, en color beige. Por el exterior se coloca un chapado de paramentos interiores, hasta 2,5 m de altura, con placas de mármol de color crema perlado, dándole un acabado pulido, rejuntado con mortero de juntas especial para revestimientos de piedra natural.

Para todos los tabiques que distribuyen las oficinas en el interior se aplica por ambas caras la misma disposición: una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento, revestido con mortero industrial imitación de revoco tradicional, en color beige, a excepción de la pared interior de los aseos que va el tabique alicatado como se indica en aseos.

Sobre todas estas áreas se realiza un forjado metálico a 3m de altura. Por la parte inferior, se ubica un falso techo registrable, formado con placas lisas de escayola, sobre perfiles metálicos, para cerrar un espacio de 20 cm de altura. Sobre dichos forjados se deja un espacio a lo largo de todo el interior de la estación para la posible ubicación de espacios publicitarios.

#### **5.2.6.1 Oficina 1**

La superficie ocupada por la oficina 1 es de 53 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

Esta oficina tiene dos ventanas colocadas su parte inferior a una altura de 1,2 m del suelo en la pared correspondiente a la fachada Sur exterior del edificio. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

#### **5.2.6.2 Oficina 2**

La superficie ocupada por la oficina 2 es de 53 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

Al igual que la oficina anterior, esta oficina tendrá dos ventanas, pero en este caso en la pared correspondiente a la fachada Este exterior del edificio, a una altura de 1,2 m la parte inferior de las mismas. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

### **5.2.6.3 Sala reuniones**

El área de sala de reuniones es de 65 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

Cuenta con una ventana que da al exterior del edificio en la fachada Este. Se trata de ventana con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

### **5.2.6.4 Despacho Jefe Estación**

El área del despacho del jefe de estación es de 39 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

En este despacho se ubican además dos ventanas, una en la fachada Este del edificio y otra en la Sur colocadas su parte inferior a una altura de 1,2 m desde el suelo. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

### **5.2.6.5 Sala control**

La superficie ocupada por la sala de control es de 25 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

Cuenta con una ventana en la fachada Sur exterior al edificio, situada el marco inferior de la misma a una altura de 1,2 m del suelo, facilitando así la visualización del acceso de los distintos autobuses a través de dichas ventanas. Se trata de ventana con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

### **5.2.6.6 Oficina Diputación de Burgos**

La superficie destinada finalmente para la oficina de la Diputación de Burgos es de 44 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo1.

Tiene dos ventanas ubicadas en paredes diferentes, tal y como viene indicado en el plano mencionado en el párrafo anterior, una orientada al Sur y otra al Oeste, a una altura el marco inferior de las mismas de 1,2 m. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, utilizado para realizar el conformado de ventana de aluminio, con perfilería provista de rotura de puente térmico.

### **5.2.6.7 Sala conductores**

La superficie ocupada por la sala de conductores es de 60 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

Tiene dos ventanas ubicadas en la misma pared, orientadas al Este, a una altura el marco inferior de las mismas de 1,2 m. Se trata de ventanas con carpintería de aluminio, anodizado color bronce, para conformado de ventana de aluminio, con perfilera provista de rotura de puente térmico.

#### **5.2.6.8 Aseos femeninos**

Finalmente la superficie ocupada por los aseos femeninos de las oficinas es de 16 m<sup>2</sup>. Como se calculó en el dimensionamiento en el apartado 4.3.6.8 y 4.3.6.9 se ubican dos lavamanos y dos retretes en cada uno de los aseos, siendo uno de ellos adaptado para personas con movilidad reducida.

Se conforman mediante un tabique formado por una hoja de partición interior de 7 cm de espesor de fábrica, de ladrillo cerámico hueco para revestir recibida con mortero de cemento. El revestimiento interior de los aseos es alicatado con azulejo decorativo con las piezas dispuestas a cartabón, colocado sobre una superficie que actúa como soporte mediante mortero de cemento sin junta, con un color negro moteado. En el exterior se aplica un mortero industrial imitación de revoco tradicional, escogiendo uno con color beige.

#### **5.2.6.9 Aseos masculinos**

El área destinada a aseos masculinos es similar a los femeninos y su situación y distribución es según se indican en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

#### **5.2.6.10 Cuarto limpieza**

La superficie ocupada por el cuarto de limpieza es de 8 m<sup>2</sup>. Se puede ver su situación en el plano 2 de planta incluido en el Anexo 1.

A modo de resumen se muestra en la Tabla 5.1 las superficies destinadas finalmente a cada una de las dependencias descritas anteriormente.

Tabla 5.1: Cuadro de superficies

	SUPERFICIE ÚTIL		SUPERFICIE CONSTRUIDA	
<b>CAFETERIA RESTAURANTE</b>	<b>478,7</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>491,8</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Cafetería	218,8	m <sup>2</sup>	221,2	m <sup>2</sup>
Comedor	107,5	m <sup>2</sup>	109,7	m <sup>2</sup>
Cocina	73,1	m <sup>2</sup>	75,4	m <sup>2</sup>
Cuarto limpieza	7,1	m <sup>2</sup>	7,9	m <sup>2</sup>
Almacén cafetería	32,1	m <sup>2</sup>	33,8	m <sup>2</sup>
Aseo Masculino	14,7	m <sup>2</sup>	16	m <sup>2</sup>
Aseo Femenino	14,7	m <sup>2</sup>	16	m <sup>2</sup>
Cuarto de basuras	10,7	m <sup>2</sup>	11,8	m <sup>2</sup>
<b>OFICINAS</b>	<b>476,6</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>500,6</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Oficina1	49,6	m <sup>2</sup>	53,2	m <sup>2</sup>
Oficina2	49,6	m <sup>2</sup>	53,2	m <sup>2</sup>
Oficina Diputación Burgos	40,9	m <sup>2</sup>	43,8	m <sup>2</sup>
Sala de reuniones	62,3	m <sup>2</sup>	64,7	m <sup>2</sup>
Despacho jefe estación	37,5	m <sup>2</sup>	39,3	m <sup>2</sup>
Sala de control	23,4	m <sup>2</sup>	25,1	m <sup>2</sup>
Sala Conductores	58,7	m <sup>2</sup>	60,4	m <sup>2</sup>
Paso	118,4	m <sup>2</sup>	120,3	m <sup>2</sup>
Aseos Masculino	14,8	m <sup>2</sup>	16,3	m <sup>2</sup>
Aseos Femenino	14,8	m <sup>2</sup>	16,3	m <sup>2</sup>
Cuarto limpieza	6,6	m <sup>2</sup>	8	m <sup>2</sup>
<b>ÁREAS Y SERVICIOS DISTINGUIBLES EN LA TERMINAL</b>	<b>3309,3</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>3321,3</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Vestíbulo General Estación	2943,7	m <sup>2</sup>	2945,7	m <sup>2</sup>
Venta de Tickets	201,1	m <sup>2</sup>	204,3	m <sup>2</sup>
Tiendas	45,4	m <sup>2</sup>	48,1	m <sup>2</sup>
Consigna	36,7	m <sup>2</sup>	37,3	m <sup>2</sup>
Aseos Masculino	28,8	m <sup>2</sup>	30,2	m <sup>2</sup>
Aseos Femenino	28,8	m <sup>2</sup>	30,2	m <sup>2</sup>
Cuarto Limpieza	24,8	m <sup>2</sup>	25,5	m <sup>2</sup>
<b>ZONA DÁRSENAS</b>	<b>3612,6</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>3618,9</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Zona Peatonal Perimetral-Dársenas	969	m <sup>2</sup>	971,5	m <sup>2</sup>
Zona de rodadura	2643,6	m <sup>2</sup>	2647,4	m <sup>2</sup>
<b>APARCAMIENTO</b>	<b>4223,6</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>4230,85</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Jardines y acceso	540,6	m <sup>2</sup>	543,2	m <sup>2</sup>
Cuarto de control	8	m <sup>2</sup>	9,25	m <sup>2</sup>
Zona Vehículos	3675	m <sup>2</sup>	3678,4	m <sup>2</sup>

## **6 RUTAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN**



Antes de nada indicar que los estudios de optimización de rutas interurbanas en España no se llevan a cabo como tal, ya que se trata de un sistema concesional. En base a la demanda que existe en el momento de realizar el estudio tipo concesional por subasta-adjudicación, el Ministerio de Fomento saca a subasta una ruta determinada, indicando el tipo de servicio que quiere que los usuarios reciban. Como ejemplo se pone el caso en el que el Ministerio indica que quiere que se realice la ruta Aranda de Duero - Burgos, a través de la autovía A-1, sin paradas en pueblos, y quiere una frecuencia de autobuses de cinco autobuses/día, esto será, cinco de ida y cinco de vuelta. Una vez que se conocen dichos datos, diferentes empresas de transporte de pasajeros realizan sus ofertas indicando las condiciones de las mismas entre las que estarán el presupuesto anual bajo el que estarían dispuestos a realizar dicho servicio. En ese momento, el Ministerio analiza las diferentes ofertas obtenidas y escoge una de ellas por un periodo de tiempo determinado. Acabado ese periodo se repite el proceso.

En este Proyecto Fin de Carrera, se va a realizar este análisis de optimización de ruta sin tener en cuenta este sistema concesional, ya que si se tuviera, cualquier estudio carecería de sentido.

El primer punto a abordar en el diseño óptimo de rutas de la nueva terminal, es evaluar las rutas a las que se da servicio actualmente, y estudiar los diferentes parámetros sobre los que actuar para hacer que estas sean lo más óptimas posibles, es decir, sean lo más baratas tanto para la compañía que ofrece el servicio como para los usuarios que las utilizan. Entendiendo como barato para el usuario viajes de corta duración en tiempo, y para la compañía será más barato cuantos menos autobuses tenga que poner en funcionamiento.

## 6.1 Rutas operando actualmente

### 6.1.1 Datos de las rutas

Lo primero que se ha realizado en este punto es un trabajo de recogida de información sobre las rutas actuales. Estos datos se pueden ver en la Tabla 6.1, los datos se han expuesto de tal forma que sean lo más visuales posibles. En dicha tabla se recogen únicamente los viajes de ida con salida desde la terminal Arandina, puesto que los de vuelta son simétricos respecto de estos.

De igual forma, puesto que se busca realizar un estudio de optimización genérico, el núcleo del estudio son los viajes que se dan en un día laboral cualquiera del año, es decir, un día de diario, ya que los fines de semana cuentan con algunos viajes excepcionales que dificultarían sobremanera el análisis.

Tabla 6.1: Datos rutas actuales

Destino	F	C	D	T	Carretera Ppal	CIA
Burgos	4	D	86	62,9	A-1	Alsa
	5	P	86	86,9	A-1	
Bilbao	1	D	239	174,9	A-1	
Irún	1	D	313	229	A-1,Ap1	
Madrid	4	D	161	117,8	A-1	
	3	P	161	138,8	A-1	
Salas de los Infantes	2	D	61,8	74,2	Bu-910	
Huerta del Rey	1	D	39,4	47,3	Bu-910	
León	1	D	214	214	CL-619,CL-613	Linecar
Zaragoza	3	P	270	291	N-122	
Segovia	2	D	115	115	A-1,N-110	
Sepúlveda	1	D	51,7	41,4	A-1	
Barcelona	2	D	574	459,2	N-122,AP-2	Renfe Iñigo
Salamanca	2	D	212	212	N-122,A-62	
Tarifa	1	P	910	883	A-1,A-4	Socibus
Valladolid	8	D	95,1	95,1	N-122	La Regional
	3	P	95,1	133,1	N-122	
Roa de Duero	3	D	21,7	26	BU-120	
Burgo de Osma	2	D	57,3	57,3	N-122	

Se explica ahora la Tabla 6.1. La columna F indica las frecuencias de autobuses, sus unidades son bus/día. La columna C indica la clase del viaje, siendo D viaje directo y P viaje con paradas en localidades intermedias. La columna D indica la distancia entre Aranda de Duero y el destino en Km. La columna T es la columna de tiempos que nos muestra el tiempo empleado por los autobuses en viajar de Aranda de Duero al destino en minutos. En la siguiente columna se indican las carreteras principales por las que pasa la ruta, y en la última columna la compañía que lo cubre.

Además hay que destacar que todos los autobuses operando en las diferentes rutas son autobuses de gran tamaño de 55 plazas de media, dato que también se tendrá en cuenta más adelante en el análisis.

Se trata de una tabla resumen, en la que no se han incluido las poblaciones intermedias a las que también se da servicio con las diferentes rutas, eso se tiene en cuenta más adelante con nuestro análisis de optimización.

No se entra a valorar el relieve de la ruta, edad de la flota utilizada y otras variables que pudieran afectar a la ruta ya que se considera que están incluidos en el tiempo medio que se indica en la Tabla 6.1.

## 6.2 Problemas de optimización de rutas

Existen diferentes razones por las que no se realizan estudios de optimización de rutas interurbanas como tal en transporte de personas en autobús.

Entre ellas cabe destacar que fijándose únicamente en el criterio económico muchas de las poblaciones de menor tamaño que se atienden actualmente por diversas rutas, no serían atendidas ya que el servicio prestado no justifica el sobrecoste que supone. Además los factores sobre los que actuar para poder llevar a cabo la optimización se reduce significativamente con respecto a los relacionados al transporte urbano, ya que la posibilidad, por ejemplo, de modificar las rutas buscando caminos de menor costo es complicada debido a que el cambio en el costo de una ruta interurbana a otra es exagerado, además otro factor importante para las rutas urbanas que no servirá en este caso es la modificación de las frecuencias.

Pese a lo anterior, debido a la escasez de bibliografía encontrada relativa a la optimización de rutas en transporte interurbano, lo que se hace es usar como base la optimización de rutas urbanas y extrapolarlo a las interurbanas. Después se comprueba que el análisis efectuado es factible para el problema en cuestión y desprende resultados aceptables.

El problema de optimización que se analiza es el problema tipo *Transit Network Design Problem (TNDP)*. Como problema ha sido estudiado por diferentes autores en el pasado, pero siempre en lo relativo a rutas urbanas y no interurbanas.

La evolución de este tipo de estudios ha desencadenado actualmente en estudios metaheurísticos de obtención de soluciones aproximadas. Debido a que se trata de un problema de alta complejidad combinatoria, es imposible realizar una enumeración completa de las soluciones factibles, ya que la función objetivo estará compuesta por dos, la asociada a los usuarios y la asociada a los operadores.

Todos los algoritmos de optimización encontrados en la bibliografía para el *TNDP* son de tipo aproximado, y se pueden clasificar principalmente en dos categorías:

- a) Algoritmos ávidos puros o heurísticas puras. Son algoritmos que construyen una solución incrementalmente, optimizándolas localmente, según reglas cuyo fundamento radica en el

conocimiento del problema particular. Por ello los resultados que desprende son a primera vista buenos, pero no garantizan en ningún caso la obtención de la solución óptima.

- b) Metaheurísticos. Son algoritmos combinatorios de heurísticas básicas, que realizan exploraciones y búsquedas comparativas de soluciones optimizadas.

La tendencia actual como se ha comentado es decantarse por los metaheurísticos. Si bien antes de ellos todos los modelos encontrados se fundamentaban en algoritmos ávidos puros, que en resumen actúan generando un solución tomando decisiones localmente óptimas (dentro de esa propia solución) y se detienen en el momento en el que encuentran la primera solución factible. Mientras que los algoritmos metaheurísticos encuentran infinidad de soluciones factibles y tras realizar una comparación o filtrado entre las mismas lanzan la solución factible encontrada. Estos algoritmos se basan en algoritmos genéticos, que es una metodología de búsqueda fundamentada en la evolución biológica. No se entra a describirlos por salirse de la finalidad del presente proyecto.

En los siguientes apartados se habla de métodos utilizados para la optimización de rutas urbanas y se explican sus modelos y características, más adelante se indican las modificaciones necesarias para que pueda ser útil en el caso concreto de estudio.

### 6.3 Modelos y algoritmos de optimización

Han sido muchos los autores que han desarrollado modelos de optimización para el *TNDP*. Para el caso que se va a estudiar se usa como base a dos de ellos, ya que se cree que serán los que mejor capacidad de adaptación tengan a un caso de rutas interurbanas. El primero de ellos será el modelo de Baaj and Mahmassani [4], y el segundo el modelo propuesto por Antonio Mauttone [1].

#### 6.3.1 Modelo de Baaj and Mahmassani (1991)

Se incluye este modelo en el presente proyecto debido a que se trata del modelo en el que se ha basado el algoritmo que finalmente se ha implementado y desarrollado para la optimización del caso concreto que se estudia.

Se propone en este modelo la optimización de una función objetivo formada a su vez por dos funciones objetivo diferentes, como son la asociada a usuarios y la asociada a operadores. Estas a su vez se ponderan por coeficientes que se encargaran de la necesaria conversión a unidades comunes de ambas funciones.

La función objetivo de los usuarios se representa como la minimización

de los tiempos de viaje, compuestos por tiempo en vehículo, tiempo de espera y tiempo de transbordo, para todo par de nodos  $(i, j)$  de la red  $G$ . Estos tiempos van ponderados en la función objetivo por la correspondiente demanda entre dichos nodos.

La función objetivo asociada a los operadores se representa por la cantidad de autobuses necesarios para cubrir los recorridos  $(N_k)$ , que serán igual al producto de las frecuencias de cada recorrido por el tiempo de viaje desde el primer nodo del recorrido  $r$  al último.

Queda el problema formulado de la siguiente manera:

$$\min \left\{ a1 \cdot \sum_{i,j \in [1..n]} d_{ij} \cdot (tv_{ij} + te_{ij} + tt_{ij}) + a2 \cdot \sum_{rk \in R} f_k \cdot t_k \right\}$$

$$sa \left\{ \begin{array}{l} f_k \geq fmin \quad \forall rk \in R \\ LFk = \frac{\varphi_k^*}{f_k \cdot CAP} \leq LFmax \quad \forall rk \in R \\ \sum_{rk \in R} f_k \cdot t_k \leq Wmax \\ R \subseteq \Omega \\ N_k \in \mathbb{R}^+ \end{array} \right.$$

dónde:

- $LFk$  es el factor de carga del autobús en el recorrido  $rk$ . Un factor de carga superior a 1 indicaría que el autobús transporta más pasajeros que los que podría llevar según la capacidad que tiene para pasajeros sentados. Da una idea de lo llenos que van los autobuses. En transporte urbano pueden viajar pasajeros de pie, pero esto no es aceptable en transporte interurbano.
- $\varphi_k^*$  es el máximo flujo soportado por arco del recorrido  $rk$ , en términos de demanda asignada.
- $CAP$  es la capacidad de pasajeros sentados en cada uno de los autobuses.
- $LFmax$  es el máximo factor de carga que se admite.
- $Wmax$  es el valor límite que puede alcanzar la función de costo para los operadores, es decir, es la flota máxima de la que dispone la compañía para cubrir ese recorrido

### 6.3.2 Algoritmo de Baaj and Mahmassani (1991,1995)

El algoritmo diseñado por Baaj y Mahmassani resuelve de forma aproximada el problema planteado por ellos mismos años antes. Este algoritmo se compone a su vez de tres algoritmos que actúan de forma independiente,

estos son:

- a) RGA (*Route Generation Algorithm*), es el encargado de generar el conjunto de recorridos  $R$  en base a la información de la red y la demanda.
- b) TRUST (*Transit Route Analyst*), lo que hace es evaluar las funciones objetivo, tanto la asociada a usuarios como la asociada a operadores y asigna el conjunto de frecuencias  $F$  asociadas al conjunto de recorridos  $R$  que cumplen con la restricción de máximo factor de carga de los buses.
- c) RIA (*Route Improvement Algorithm*), modifica las soluciones obtenidas  $S=(R, F)$  que mejoran ambas funciones objetivo.

Dado que no va a ser el método que se implemente para la optimización en el presente proyecto, únicamente se van a incluir los diagramas de flujos asociados a dichos algoritmos y al algoritmo completo de este modelo.

Se muestran cada uno de estos diagramas en figuras en las páginas posteriores, los diagramas mostrados son:

- Diagrama de flujo algoritmo RGA (Figura 6.1).
- Diagrama de flujo algoritmo TRUST (Figura 6.2).
- Diagrama de flujo algoritmo RIA (Figura 6.3).
- Diagrama de flujo algoritmo Baaj y Mahmassani (Figura 6.4).

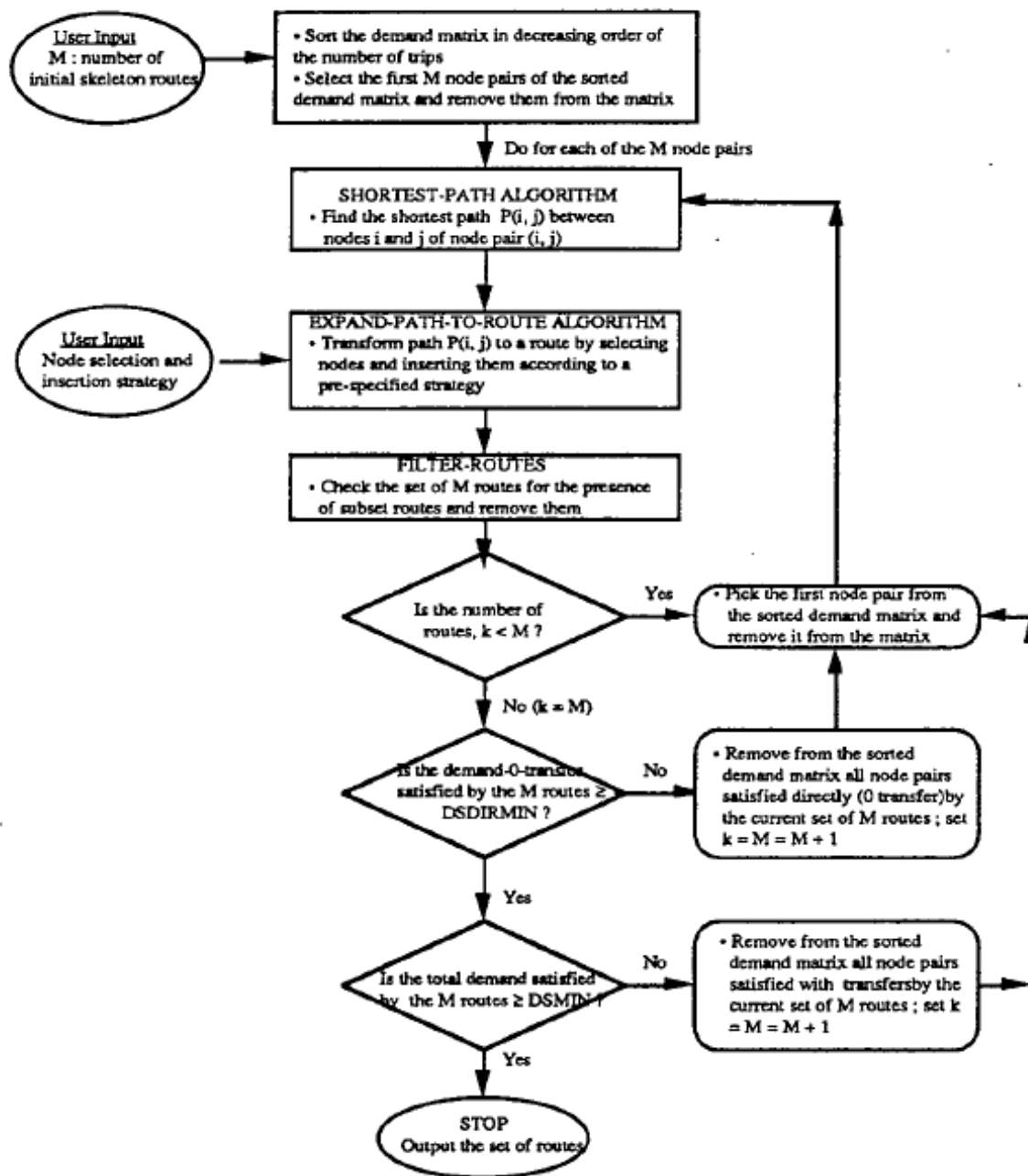


Figura 6.1: Algoritmo RGA

El desarrollo de este algoritmo permite obtener los recorridos primarios más adecuados en base a la red y a la demanda que se le asocia.



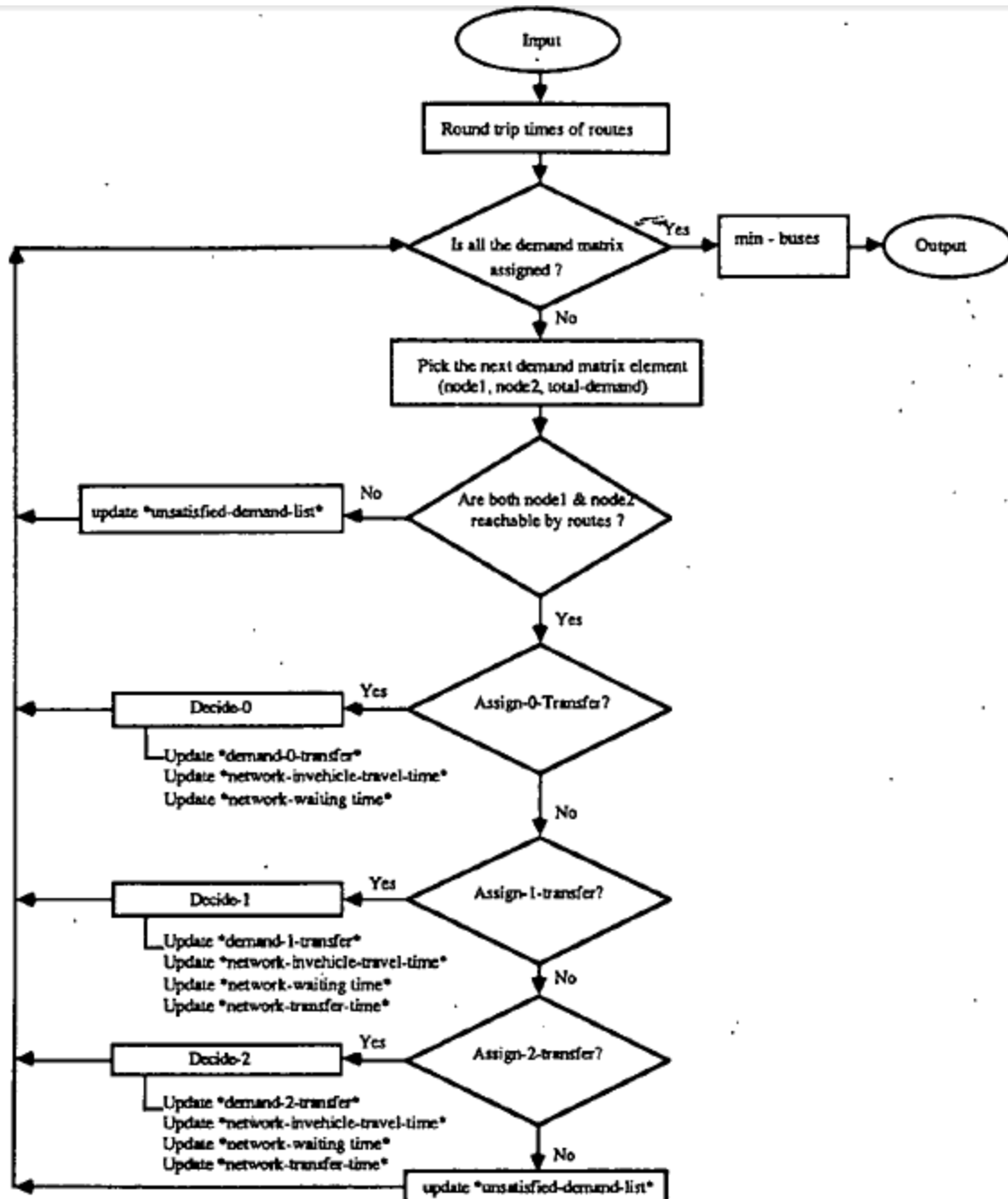


Figura 6.2: Algoritmo TRUST

A partir de este algoritmo se evalúan las funciones objetivo y se asignan las frecuencias adecuadas a los recorridos generados por medio del algoritmo RGA.



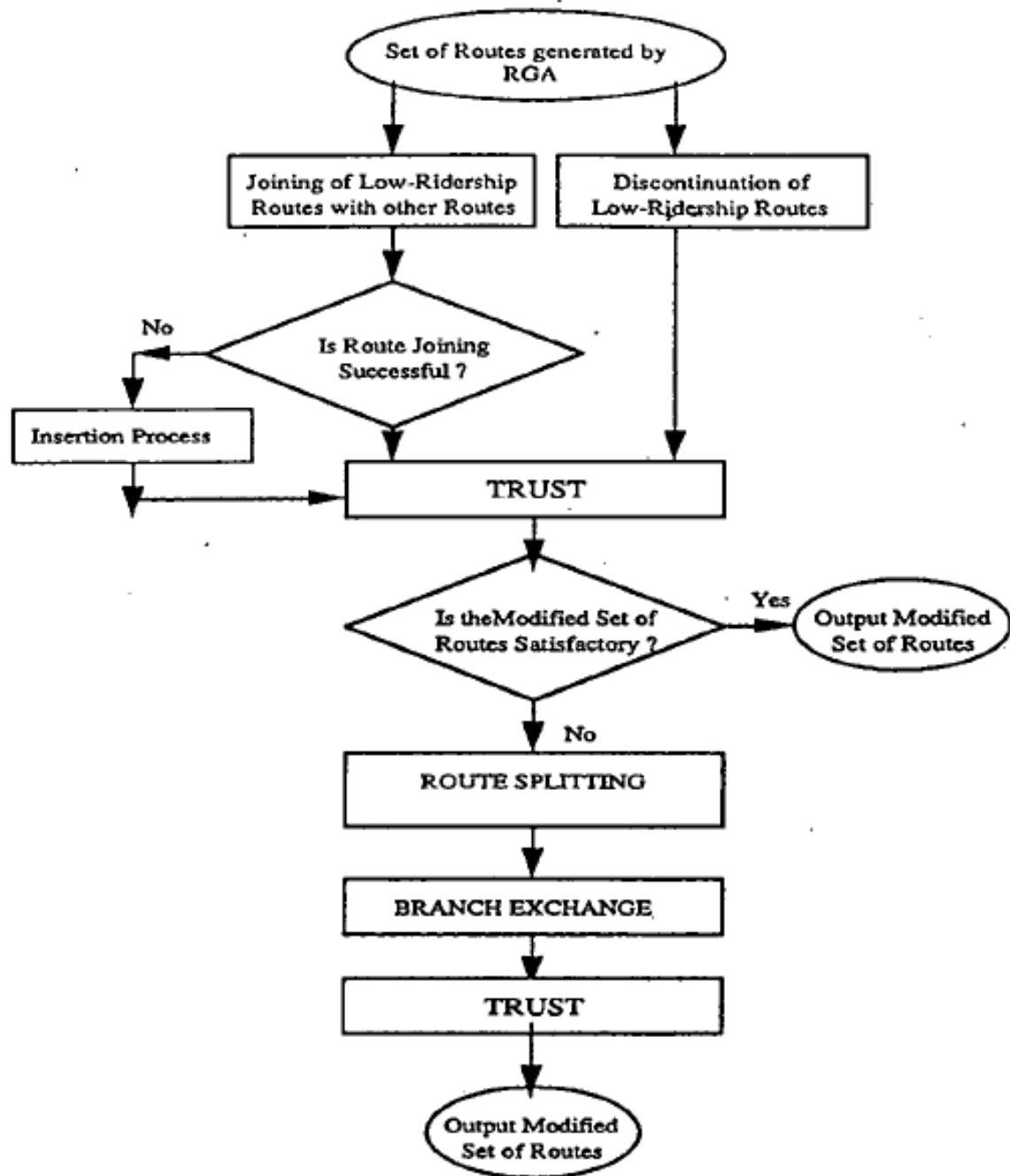


Figura 6.3: Algoritmo RIA

Se modifican las soluciones obtenidas por medio de los algoritmos RGA y TRUST intentando mejorarlas.

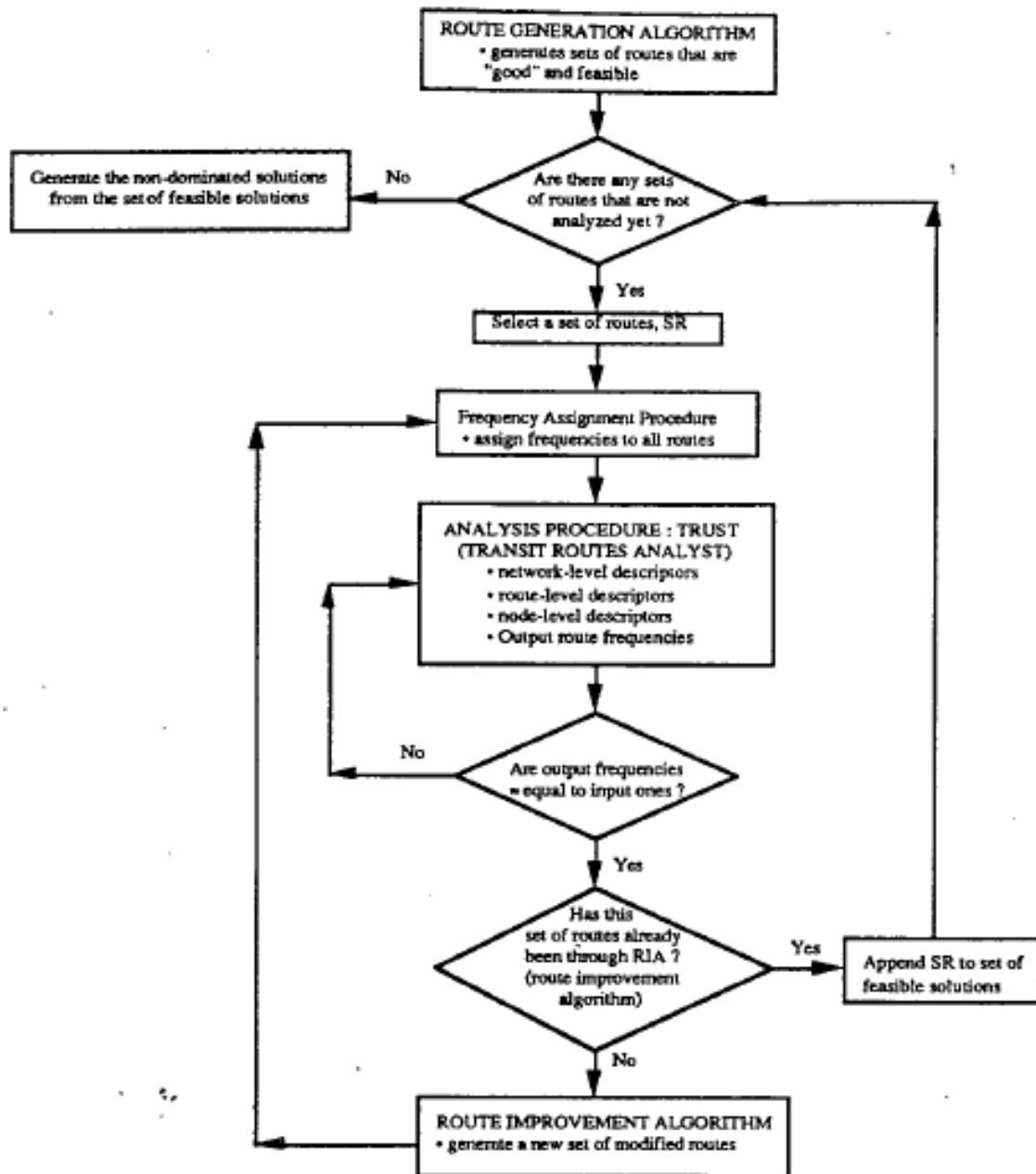


Figura 6.4: Algoritmo Baaj y Mahmassani

Se describe en la Figura 6.4 la forma de interactuar entre los algoritmos mostrados en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3.

### 6.3.3 Modelo propuesto para la resolución por GRASP del TNDP

Se presenta el modelo de optimización propuesto por Mauttone para el TNDP. La formulación del mismo está fuertemente basada en las existentes de Baaj y Mahmassani [4] y Ceder y Wilson [2]. De los primeros se toma la formulación de las funciones objetivos y algunas restricciones, y de los

segundos la característica de formular un modelo multiobjetivo. Además Mauttone añade algunas restricciones que no existían en el modelo hasta ese momento, el modelo queda formulado:

$$\begin{aligned} \min Z1 &= \left\{ \sum_{i,j \in |1...n|} d_{ij} \cdot (tv_{ij} + te_{ij} + tt_{ij}) \right\} \\ \min Z2 &= \left\{ \sum_{r_k \in R} f_k \cdot t_k \right\} \\ \text{sa} \left\{ \begin{array}{l} D_0 \geq D_0^{min} \in [0,1] \\ D_{01} \geq D_{01}^{min} \in [0,1] \\ f_{min} \leq f_k \leq f_{max} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall r_k \in R \\ LF_k = \frac{\varphi k *}{f_k \cdot CAP} \leq LF_{max} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall r_k \in R \\ R \subseteq \Omega \\ f_k \in \mathbb{R}^+ \end{array} \right. \end{aligned}$$

dónde:

- $D_0$  es la proporción del total de la demanda ( $\sum_{i,j \in |1...n|} dij$ ) satisfecha con viajes directos (sin transbordos) por los diferentes recorridos de la solución  $S=(R, F)$ .
- $D_0^{min}$  es la mínima proporción permitida de viajes que se deben satisfacer de manera directa.
- $D_{01}$  es la proporción del total de la demanda ( $\sum_{i,j \in |1...n|} dij$ ) satisfecha con viajes directos o con un transbordo por los diferentes recorridos de la solución  $S=(R, F)$ .
- $D_{01}^{min}$  es la mínima proporción permitida de viajes que se deben satisfacer de manera directa o con un transbordo.

Se comenta a continuación una aclaración de las novedades incluidas tanto en la función objetivo como en las restricciones que aparecen:

- Función objetivo.** En comparación con el modelo de Baaj Mahmassani visto en el apartado 6.3.2, en este caso se propone la separación de los objetivos, mostrándose así claramente la característica multiobjetivo asociada al problema. La función  $Z1$  es la asociada a los usuarios y similar al primer término del modelo de Baaj y Mahmassani y la función  $Z2$  es la que se corresponde con el operador de la ruta.
- Restricciones.** Además de la restricción del factor de carga similar a la del modelo visto en el apartado anterior, se ve que en

este modelo aparecen nuevas restricciones. La primera restricción ( $D_0 \geq D_0^{min} \in [0,1]$ ) va a permitir indicar en el algoritmo que proporción de demanda se desea satisfacer con viajes directos, es decir, que no tengan transbordo. De igual manera, la segunda ( $D_{01} \geq D_{01}^{min} \in [0,1]$ ), permite indicar que proporción de la demanda debe ser satisfecha con viajes directos y con viajes que incurran en un transbordo, pero no más. De este modo y debido a que no se contempla para este modelo más de un transbordo y dado que se quiere satisfacer el total de la demanda, este valor valdrá típicamente 1. La tercera restricción permitirá incluir límites “aceptables” de frecuencias de autobuses de tal manera que no se den soluciones cercanas al óptimo con frecuencias desproporcionadas. El resto de restricciones se comparten con el anterior modelo.

### 6.3.4 Algoritmo GRASP multiobjetivo para el TNDP

Se procede en este punto a explicar el funcionamiento de dicho algoritmo que es el que finalmente se ha implementado para el caso de estudio, efectuando las oportunas modificaciones necesarias para su extrapolación a la optimización de rutas interurbanas.

#### 6.3.4.1 Razones para el uso de GRASP

Como se ha comentado en el punto 6.2, la resolución del problema *TNDP* de manera exacta conlleva una serie de dificultades prácticamente insalvables, por ello desde el principio se descarta esa opción y se encauza el estudio por la búsqueda de soluciones aproximadas basadas en metaheurística y el uso de algoritmos genéticos.

Además, queda demostrado que estos métodos precisan de un menor coste computacional a la hora de llegar a soluciones factibles aceptables.

#### 6.3.4.2 Funcionamiento de GRASP

GRASP (*Procedimiento de Búsqueda de Ávidos Aleatorios Adaptativos*), es una metaheurística construida con la finalidad de resolver problemas de optimización combinatoria. Básicamente se trata de ejecutar de forma repetida un procedimiento de construcción de soluciones combinándolo con una búsqueda local que trata de mejorar al máximo la calidad de dichas soluciones.

Cuando este modelo es utilizado para la optimización de problemas multiobjetivo, el resultado esperado del mismo es un conjunto de soluciones, que conforman el conjunto óptimo o frente de Pareto. En principio estos modelos fueron utilizados para problemas de objetivo único, por lo que se encuentra escasa bibliografía para problemas multiobjetivo. Para el caso estudiado se puede comparar la efectividad de la implementación realizada con

los resultados de los autores mencionados en los apartados 6.3.1 y 6.3.3.

En base a dichos autores, se lleva a cabo la siguiente estrategia de resolución:

- a) En cada iteración, se obtiene una solución  $S$  construida por medio de procedimiento ávido aleatorio.
- b) A partir de esta solución, se realiza una optimización a mayores con la finalidad de mejorar dicha solución.

Cabe mencionar que dicha optimización no se aplica para la resolución efectuada en este proyecto, ya que el costo de implementarlo es muy grande en comparación con los beneficios que pudiera aportar a un problema de rutas interurbanas.

#### 6.3.4.3 GRASP en TNDP

El algoritmo que Mauttone utilizó para resolver el problema planteado en el apartado 6.3.3 da como resultado el frente de Pareto del cual ya se ha hablado, que a su vez se construye por medio de las soluciones del tipo  $S=(R, F)$ , pero únicamente las no dominadas de todas las que se encuentren y sean factibles. El algoritmo general se divide a su vez en tres algoritmos particulares:

- a) *Construcción de soluciones*. Se genera un conjunto  $R$  de recorridos en base a la información sobre la red proporcionada.
- b) *Evaluación de soluciones*. Mediante un modelo de asignación se distribuye la demanda a los recorridos, con la finalidad de hallar las frecuencias que optimizan las funciones objetivo  $Z1$  y  $Z2$  en cada uno de los recorridos.
- c) *Mejora de soluciones*. Aplica un procedimiento de optimización multiobjetivo sobre las frecuencias halladas anteriormente, que se tomaran de un conjunto de discreto de valores.

Para el problema particular que se va a resolver, no se desarrolla el apartado c), debido a que el costo de su desarrollo no justifica para un problema de redes interurbanas las mejoras que pudiere aportar.

Se pasa en los siguientes apartados a explicar cada uno de estos puntos.

#### 6.3.4.4 Construcción de soluciones en GRASP

La construcción del conjunto de recorridos  $R = (r_1 \dots r_n)$  que cumplen con las restricciones de demandas incluidas en la formulación de problema, se obtienen por medio de un proceso ávido aleatorio de construcción de soluciones. Además permite la incorporación de parámetros que hagan que los resultados sean lo más ajustados posibles y en consecuencia optimizados.

El pseudocódigo que Mauttone implementa es el mostrado en la Figura 6.5.

```

procedure Construcción(in  $G$ , in  $D$ , in  $D_0^{min}$ , in  $D_{01}^{min}$ , in  $\rho_{max}$ , in  $t_{max}$ , in  $\alpha$ ,
                        in  $semilla$ , out  $R$ );
01 Inicializar el generador de números pseudoaleatorios con  $semilla$ ;
02  $R \leftarrow \emptyset$ ;
03  $D_0 \leftarrow 0$ ;
04  $D_{01} \leftarrow 0$ ;
05  $l \leftarrow$  Lista de todos los pares de nodos  $(i, j)$  de  $G$ , ordenada en forma decreciente
    por valor de demanda  $d_{ij}$ ;
06 while  $D_0 < D_0^{min}$  or  $D_{01} < D_{01}^{min}$  do
07    $(i, j) \leftarrow$  Seleccionar aleatoriamente un elemento entre los primeros de  $l$  (según  $\alpha$ )
    y eliminarlo de  $l$ ;
08    $r \leftarrow$  Construir un recorrido con el camino más corto (tiempo de viaje en vehículo)
    de  $i$  a  $j$  en  $G$ ;
09    $r' \leftarrow$  Construir un recorrido insertando los nodos  $i$  y  $j$  en las posiciones más
    convenientes en el recorrido  $r''$  más conveniente de  $R$ ;
10   if  $costo(r') - costo(r'') < costo(r)$  then
11      $R \leftarrow R \cup \{r'\} - \{r''\}$ ;
12     Eliminar de  $l$  los pares de nodos cuya demanda es satisfecha por  $r'$ ;
13   else
14      $R \leftarrow R \cup \{r\}$ ;
15     Eliminar de  $l$  los pares de nodos cuya demanda es satisfecha por  $r$ ;
16   end if;
17    $D_0 \leftarrow$  Actualizar proporción de demanda satisfecha por  $R$  con viajes directos;
18    $D_{01} \leftarrow$  Actualizar proporción de demanda satisfecha por  $R$  con viajes directos
    o con al menos un transbordo;
19 end while;
20 Combinar recorridos cortos de  $R$ ;
21 return  $R$ ;
end Construcción;

```

Figura 6.5: Seudocódigo construcción ávida aleatoria de recorridos [1]

De forma general, este algoritmo de construcción de soluciones es similar al algoritmo que en su día propusieron Baaj y Mahmassani en su algoritmo RGA. Lo que buscan es construir los recorridos en base al camino más corto en la red entre los diferentes pares de nodos  $(i, j)$  con los valores de demanda asociada más altos. Las diferencias más llamativas con el RGA son:

- Para cada par de nodos nuevos en análisis dentro del algoritmo, se evalúa la posibilidad de insertar estos nodos en recorridos ya existentes, de tal manera que el coste añadido al recorrido que ya estaba creado sea menor que el coste de crear un nuevo recorrido entre los dos nodos.
- Pero por otro lado no se considera la expansión de recorridos mediante la inserción sucesiva de nodos en forma individual en

los recorridos como se hacía en el RGA.

Estas modificaciones se justifican por los siguientes motivos. La justificación de a) es generar soluciones con el menor número posible de recorridos, ya que parece obvio que cuantos menos sean estos, mayor facilidad habrá para optimizar ambas funciones objetivo. La de b) sin embargo se fundamenta en que la inserción de nodos de manera individual no tenía en cuenta la demanda entre los diferentes pares de nodos.

El pseudocódigo asociado al algoritmo de inserción de nodos en recorridos existentes especificado por Mauttone que se menciona en el procedimiento de construcción de recorridos es el que se muestra en la Figura 6.6.

```

procedure Insercion(in (i,j), in R, out (posI,posJ), out rCandidato);
01 posI  $\leftarrow$  0; posJ  $\leftarrow$  0; rCandidato  $\leftarrow$   $\emptyset$ ;
02 for each r  $\in$  R do
03   if i  $\in$  r
04     for each pos  $\in$  r do
05       r'  $\leftarrow$  Construir recorrido a partir de r, insertando j en la posición pos;
06       if costo(r') < costo(rCandidato)
07         rCandidato  $\leftarrow$  r'; posJ  $\leftarrow$  pos;
08       end if;
09     end for;
10   else if j  $\in$  r
11     for each pos  $\in$  r do
12       r'  $\leftarrow$  Construir recorrido a partir de r, insertando i en la posición pos;
13       if costo(r') < costo(rCandidato)
14         rCandidato  $\leftarrow$  r'; posI  $\leftarrow$  pos;
15       end if;
16     end for;
17   else
18     for each pos1, pos2  $\in$  r do
19       r'  $\leftarrow$  Construir recorrido a partir de r, insertando i en la posición pos1
20         y j en la posición pos2;
21       if costo(r') < costo(rCandidato)
22         rCandidato  $\leftarrow$  r'; posI  $\leftarrow$  pos1; posJ  $\leftarrow$  pos2;
23       end if;
24     end for;
25   end if;
26 end for;
27 return (posI, posJ), rCandidato;
end Insercion;

```

Figura 6.6: Seudocódigo de inserción de nodos en recorridos [1]

Como se puede ver en la figura, pueden darse dos casos en los que se



inserten los nodos en un recorrido, cuando uno de ellos pertenezca a alguno de los recorridos, o cuando ninguno de ellos pertenezca a alguno de los recorridos. Claro está, se comprueba cuál de todos los recorridos en los que se pueden insertar los nodos es el más económico, y únicamente se insertan si es más económico que generar un nuevo recorrido entre esos dos nodos. Los esquemas para las dos situaciones mencionadas se ven en la Figura 6.7 y en la Figura 6.8.



Figura 6.7: Situación de los nodos en estudio antes de la inserción [1]



Figura 6.8: Situación de los nodos en estudio tras la inserción [1]

#### 6.3.4.5 Evaluación de soluciones

En el proceso de construcción se obtienen los valores de  $R$  y se asignan unos valores arbitrarios para construir  $F$ . Antes de poder realizar la evaluación de las funciones objetivo  $Z1$  y  $Z2$ , se requiere la aplicación de un algoritmo de asignación de demanda a los recorridos de tal manera que se obtengan las frecuencias  $F$  más adecuadas a los recorridos obtenidos en el paso de construcción.

Para este caso Mauttone aplica un modelo de asignación muy parecido al de Baaj y Mahmassani es decir parecido al modelo TRUST explicado en el apartado 6.3.2. Es fundamental esta asignación para obtener dicha solución definitiva. Este algoritmo de asignación toma como entrada los datos de la red y de demanda, y también la solución construida por medio de los recorridos  $R$  generados en el proceso de construcción, y una serie de frecuencias arbitrarias que será el parámetro a optimizar con la asignación de demanda. Además se introducen una serie de parámetros de configuración basados en experiencia con dicho algoritmo. Se muestra el pseudocódigo del algoritmo de asignación utilizado en la Figura 6.9.



```

procedure Evaluacion(in  $G$ , in  $D$ , in  $S = (R, F)$ ,
                    out  $tv, te, tt$ , out  $D_0, D_{01}, D_{NS}$ , out  $\bar{\phi}, \phi^*$ , out  $F_{sal}$ );
01  $F_{sal} \leftarrow F$ ;
02 repeat
03    $F_{ent} \leftarrow F_{sal}$ ;
04   for  $(i, j)$  in  $[1..n] \times [1..n]$  do
05      $R_i \leftarrow$  Recorridos de  $R$  que pasan por el nodo  $i$ ;
06      $R_j \leftarrow$  Recorridos de  $R$  que pasan por el nodo  $j$ ;
07     if  $R_i = \emptyset$  or  $R_j = \emptyset$ 
08       Actualizar  $D_{NS}$ ;
09     else
10       if AsignacionDirecta( $i, j, R_i, R_j, F_{ent}$ )
11         Actualizar  $D_0$ ;
12         Actualizar  $tv$  y  $te$ ;
13         Actualizar flujos  $\phi$  en recorridos de  $R$ ;
14       else
15         if AsignacionTransbordo( $i, j, R_i, R_j, F_{ent}$ )
16           Actualizar  $D_{01}$ ;
17           Actualizar  $tv, te$  y  $tt$ ;
18           Actualizar flujos  $\phi$  en recorridos de  $R$ ;
19         else
20           Actualizar  $D_{NS}$ ;
21         end if;
22       end if;
23     end if;
24   end for;
25   Calcular  $F_{sal}$  según flujos  $\phi$ ;
26 until  $F_{ent}$  y  $F_{sal}$  no difieren significativamente;
27 return ( $tv, te, tt, D_0, D_{01}, D_{NS}, \bar{\phi}, \phi^*, F_{sal}$ );
end Evaluacion;

```

Figura 6.9: Seudocódigo algoritmo de asignación utilizado [1]

A partir del proceso de asignación se desprenden soluciones ya factibles del problema, se puede ya calcular:

- Valor de la función  $Z1$ . Como se ve en la formulación del problema esto implica calcular el tiempo en vehículo  $tv$ , tiempo de espera  $te$  y tiempo de transbordo  $tt$ .
- Valor de la función  $Z2$ . Esto implica el cálculo de la cantidad de buses necesarios  $N_k = f_k^* t_k$ , para cubrir los servicios de cada recorrido de  $R$ .
- También se obtienen otros valores de gran interés como son las proporciones de demanda satisfecha con o sin transbordo o la no satisfecha en caso de que exista ( $D_0, D_{01}, D_{NS}$ ). Por otro lado se pueden calcular también los flujos medio y crítico ( $\bar{\phi}_k, \phi_k^*$ ) de los buses en los arcos de todos los recorridos de la solución.

- d) Quizá el valor más importante por ser el que aporta la solución es el valor de las frecuencias definitivas. Para resolverlo el algoritmo toma como entrada un conjunto de frecuencias arbitrarias  $F_{ent}$ , pero no hay garantías de que con ellas se respete el factor de carga  $LF_{max}$  establecido para los autobuses que operan. Por ello, en el caso de que las frecuencias (oferta) no sean adecuadas para cubrir esta condición (demanda), que se representa por los flujos de demanda entre los diferentes arcos de cada uno de los recorridos, tras la asignación el algoritmo devuelve un conjunto de frecuencias  $F_{sal}$ , ajustadas a la demanda. Se repite el proceso con este valor de frecuencias como dato de entrada hasta que la diferencia entre las frecuencias de entrada y salida sea menor que un parámetro especificado. Se puede entender como un ajuste entre oferta y demanda.

#### 6.3.4.6 Mejora de soluciones

Como se ha explicado en el apartado 6.3.4.3 anteriormente, es la tercera parte del GRASP. Pero no lo se implementa debido a que el costo de su desarrollo no justifica para un problema de redes interurbanas las mejoras que pudiese aportar.

### 6.4 Software utilizado y esquema del algoritmo GRASP implementado

#### 6.4.1 Software utilizado

Para este proyecto y para resolver el problema concreto planteado de la terminal de autobuses de Aranda de Duero se ha implementado el código del algoritmo GRASP para el *TNDP* en *Wolfram Mathematica 10.0*.

Mathematica es un programa utilizado en áreas científicas, de ingeniería, matemáticas y áreas computacionales. Se divide en dos partes, por un lado el “kernel” o núcleo (en informática) que desempeña los cálculos y por otro el “front end” o interfaz, que despliega los resultados y permite al usuario interactuar con el núcleo como si este fuera un documento.

El lenguaje de programación de Mathematica está basado en la re-escritura de términos (computación simbólica), y soporta el uso de programación funcional y de procedimientos. Está implementado en una variante del lenguaje C orientado a objetos, pero el grueso del extenso código de librerías está en realidad escrito en el lenguaje Mathematica, que puede ser usado para extender el sistema algebraico.

El código en primer lugar ha sido desarrollado para la resolución de optimización de rutas en transporte público urbano, y más tarde se adaptará por medio de los datos de entrada para poderlo utilizar en el caso de rutas

interurbanas que nos afecta.

En la bibliografía se han encontrado pocos ejemplos numéricos con los que comparar los resultados obtenidos y así poder contrastar la validez de dicha implementación. El único caso encontrado fue el propuesto por *Mandl* [3], que fue resuelto en su día por el algoritmo de Baaj y Mahmassani [4] y más tarde por otra implementación diferente a la realizada en este proyecto del algoritmo GRASP por Mauttone [1].

#### 6.4.2 Esquema del algoritmo implementado

Básicamente se han seguido las partes descritas en el apartado 6.3.4 para el GRASP. En *Mathematica* se ha diseñado el algoritmo en tres “notebooks” diferentes, en cada uno de ellos se ha implementado una parte del código de la siguiente manera:

- a) El primero de los “notebooks” es el llamado Datos. En él se incluye toda la información necesaria para la ejecución del algoritmo a partir de la formulación del GRASP.
- b) El segundo de los ficheros es el llamado Construcción. Contiene todas las funciones necesarias para llevar a cabo el algoritmo de construcción indicado en la Figura 6.5.
- c) Por último tendremos el fichero llamado Asignación, que se encarga de implementar el algoritmo de asignación mostrado por la Figura 6.9.

Se ve en los siguientes apartados un poco más en detalle cada uno de ellos.

##### 6.4.2.1 Notebook “Datos”

Se incluyen dentro del mismo todos los parámetros necesarios para definir el problema. Estos serán:

- a) *Parámetros del modelo*. Son los parámetros que figuran en la formulación del modelo además de otros que definen la red, son:
  - $D_0^{min}$ : Mínima proporción de demanda satisfecha por viajes directos.
  - $D_{01}^{min}$ : Mínima proporción de demanda satisfecha con viajes directos o viajes con sólo un transbordo.
  - $f_{min}$ : Frecuencia mínima para las frecuencias de salida del proceso de asignación. Todas las soluciones en las que haya al menos una frecuencia inferior a esta se descartan.
  - $f_{max}$ : Frecuencia máxima para las frecuencias de salida del proceso de asignación. Todas las soluciones en las que haya al menos una frecuencia superior a esta se descartan.

- *CAP*: Capacidad de pasajeros en los buses.
  - *LFmax*: Factor de carga de los buses.
- b) *Parámetros de la red*. Son los parámetros que definen la red por la que van a circular los autobuses.
- *NNodos*: Número de nodos que componen la red en estudio.
  - *Matrizcon*: Es la matriz de conectividad asociada a la red. Indica si los nodos están conectados de forma directa por algún arco. Si están conectados en la matriz aparece un 1, si no, aparece un 0.
  - *Matrizode*: Es la matriz origen destino de la red. En ella aparecen los costos de trasladarse entre cada par de nodos en caso de que estos estén conectados directamente por un arco. El costo viene especificado en días.
  - *Matrizdem*: Es la matriz de demanda. Se especifica la demanda que pretende trasladarse entre cada par de nodos, en este caso no es necesario que ambos nodos estén conectados directamente por un arco.
  - *D*: Demanda total en la red. Es la suma de los valores que aparecen en la matriz de demanda.
- c) *Parámetros de evaluación*. Son un conjunto de parámetros utilizados en la evaluación de soluciones.
- $\sigma d$ : Filtro para los recorridos candidatos. No se consideran recorridos cuyo largo exceda la proporción especificada por este parámetro con respecto al recorrido más corto que una los nodos en cuestión.
  - $\sigma t$ : Parámetro similar al anterior. Lo que ocurre que este es aplicado para los viajes con transbordos.
  - $pt$ : Penalización tenida en cuenta por tener que realizar transbordo.
  - $\delta F$ : Proporción de diferencias máxima entre las frecuencias de entrada en el proceso de asignación y las frecuencias de salida. Es el valor que indica lo que se deben parecer las frecuencias de entrada y salida en el proceso de asignación para que se dé por terminado el proceso de optimización.

#### 6.4.2.2 Notebook “Construcción”

No se va a entrar a describir todas las funciones que se encuentran en este notebook. Simplemente recalcar que en este fichero se incluyen todas las funciones necesarias para implementar el algoritmo de construcción de

recorridos. Se basa en el pseudocódigo mostrado en la Figura 6.5 de construcción GRASP.

#### 6.4.2.3 Notebook “Asignacion”

Tampoco se entra a describir todas las funciones que aparecen en este documento. Todo el código se adjunta en el documento informático que se entrega con este proyecto. En él se incluyen todas las funciones que implementan el algoritmo de asignación y devuelve todas las soluciones encontradas para el problema en cuestión, el pseudocódigo es el mostrado en la Figura 6.9.

### 6.5 Evaluación del algoritmo GRASP implementado

Para evaluar el algoritmo lo que se hace es resolver el problema de Mandl, ya que es el único para el cual se tienen soluciones de algoritmos parecidos, y ver así lo óptimo que resultan las soluciones de la implementación realizada en este proyecto en comparación con los otros de cara a utilizarlo para resolver los problemas particulares planteados.

#### 6.5.1 Definición del problema de Mandl

Se trata de una abstracción que modela parte del sistema de transporte público de una ciudad no especificada de Suiza. La red está compuesta por 15 nodos y 21 arcos. La matriz origen destino es simétrica y altamente densa.

El esquema de dicha red se muestra en la Figura 6.10. En dicha figura se puede ver que los nodos se representan por medio de círculos. Además los nodos que en la realidad están unidos por una carretera en este esquema se representa con una línea que une ambos nodos que lo indica, esta línea se conocerá a partir de ahora como arco. Sobre dichos arcos se muestra un valor correspondiente con el coste en tiempo de viajar entre los dos nodos en cuestión, este tiempo viene representado en minutos. Se puede ver también que los nodos vienen numerados de tal forma que faciliten la implementación de algoritmo relativo a esta red.

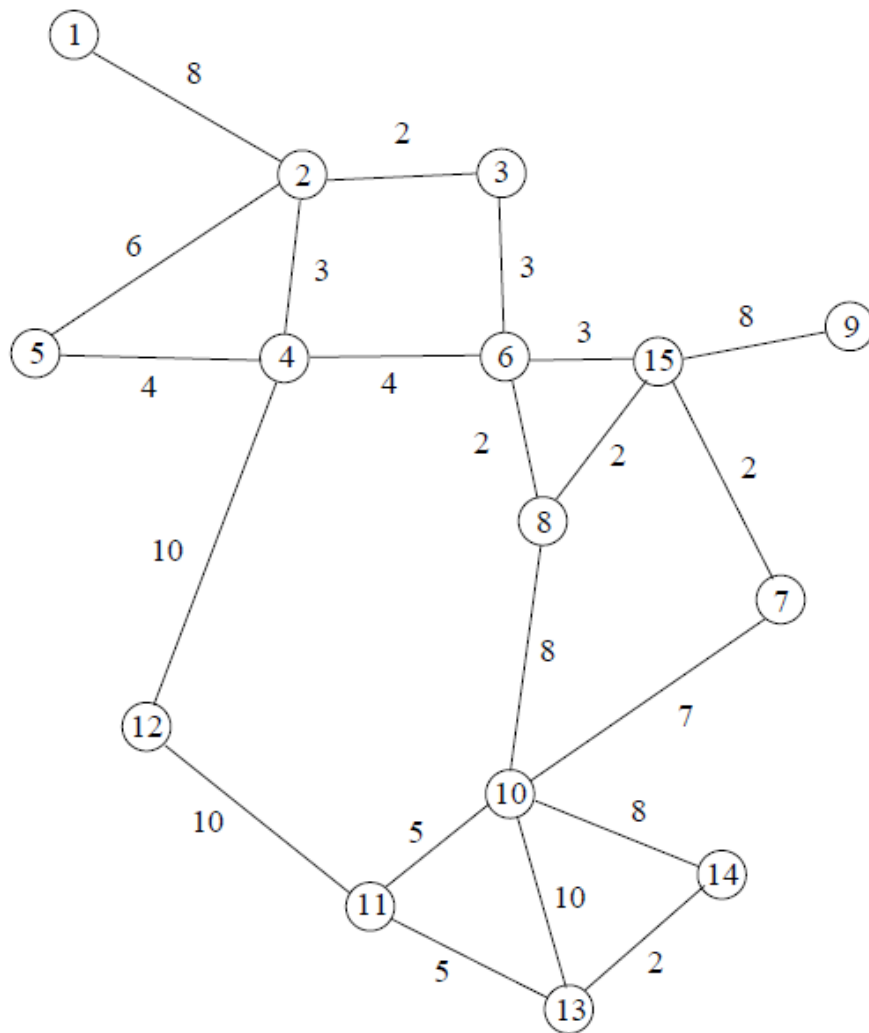


Figura 6.10: Red del caso de Mandl [1]

Como se ha comentado en el párrafo anterior, se muestran los nodos numerados de la red y el tiempo de viaje de todos los arcos en minutos.

La matriz de demandas de dicha red es la representada en la Tabla 6.2 que se muestra a continuación. En ella se pueden ver la cantidad de personas que se desea trasladar entre los diferentes nodos que componen dicha red. Se puede apreciar que se trata de una matriz simétrica, cosa que ocurre en el resto de matrices también y facilitará en gran medida el proceso computacional a llevar a cabo.

Tabla 6.2: Matriz de demanda caso Mandl [1]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
2	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
3	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
4	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
5	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
6	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
7	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
8	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
9	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
10	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
11	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
12	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
13	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
14	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La matriz de conectividad asociada al problema de Mandl es la representada en la Tabla 6.3, y la matriz origen destino se puede visualizar en la Tabla 6.4. Mientras que a la matriz de conectividad por lo que expresa no se le asignan unidades, las unidades asociadas a la matriz origen destino para este problema en concreto es en minutos. Aunque para los problemas que se estudian a partir del apartado 6.6.3 estas unidades serán días.

Tabla 6.3: Matriz de conectividad caso Mandl

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
15	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0



Tabla 6.4: Matriz origen-destino caso Mandl

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8	0	2	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	3	0	0	4	4	0	0	0	0	0	10	0	0	0
5	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	3	4	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	2
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8	0	0	0	0	2
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
10	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	5	0	10	8	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	10	5	0	0
12	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	5	0	0	2	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	2	0	0
15	0	0	0	0	0	3	2	2	8	0	0	0	0	0	0

### 6.5.2 Valor de los parámetros para el problema de Mandl

Los valores de los parámetros utilizados para resolver el problema de Mandl son:

#### a) Parámetros del modelo:

- $D_0^{min} = 0,7$ . El 70% de la demanda debe ser satisfecha con viajes directos.
- $D_{01}^{min} = 1$ . Toda la demanda debe ser satisfecha con viajes directos y viajes que solo tengan un transbordo.
- $f_{min} = \frac{1}{60}$ . Pasará al menos un autobús cada 60 minutos.
- $f_{max} = 2$ . No pasarán más de 2 autobuses cada minuto.
- $CAP = 40$ . Caben 40 personas sentadas en los autobuses.
- $LFmax = 1,25$ . Los autobuses podrán llevar un 25% más de pasajeros de los que van sentados, es decir, en cada autobús de forma excepcional pueden viajar 50 personas.

#### b) Parámetros de la red:

- $NNodos = 15$ .
- *Matrizcon.* Se ha definido en la tabla 6.3 la matriz de conectividad de la red.
- *Matrizode.* Se ha definido en la tabla 6.4 la matriz origen-destino de la red.
- *Matrizdem.* Se ha definido en la tabla 6.2 la matriz de demanda de la red.
- $D = 15570$ . Se debe tener en cuenta las unidades en las



que viene expresada la demanda en cada problema. En este caso, el artículo original de Baaj y Mahmassani indicaba que la demanda venía expresada en cantidad de viajes por día. Sin embargo esto es una errata tal como indica Mauttone en su tesis doctoral, pues para estas se tomó como unidades viajes por hora, que son las que se usan para que el análisis sea consistente.

c) *Parámetros de evaluación:*

- $\sigma d = 1,5$ . No se aceptan recorridos cuyo largo supere en 1,5 veces el recorrido más corto que una los nodos en cuestión.
- $\sigma t = 1,1$ .
- $pt = 5$ . Se penaliza con 5 min cada transbordo que se realice.
- $\delta F = 0,05$ . El algoritmo de asignación se detiene cuando la máxima diferencia de cada una de las frecuencias de entrada con cada una de las de salida no se exceda en un 5%.

Ya se tienen todos los parámetros fundamentales del problema definidos.

### 6.5.3 Resultados obtenidos con nuestro código GRASP

La solución a un modelo de optimización multiobjetivo por métodos aproximados consiste en un conjunto de soluciones (dependiente del número de iteraciones que se realicen) no dominadas, es decir, soluciones tales que no existe otra solución en el conjunto de soluciones que mejore ambas funciones objetivo con respecto a la primera, las cuales conformarán un frente de Pareto. Se ven en este punto estos frentes de Pareto generados y también los valores más significativos de las diferentes soluciones halladas.

Se va a visualizar los resultados obtenidos a partir de la implementación realizada del algoritmo. Claro está, las soluciones varían al modificar el número de veces que se ejecuta el algoritmo en su búsqueda.

No necesariamente mayor número de iteraciones implica obtener soluciones más optimizadas pero si se aumenta la posibilidad de obtenerlas, sobre todo si se está hablando de números no muy elevados. Por ello, se ha ejecutado el algoritmo con el número de iteraciones modificado en cada ocasión, una con 500 y otra con 1000. Se analizan dichas soluciones a continuación.

#### 6.5.3.1 Soluciones con 500 iteraciones

Una forma gráfica de mostrar las soluciones es a partir del frente de

Pareto generado. Se ven las soluciones para 500 iteraciones.

El frente de Pareto generado por las 9 soluciones no dominadas es el mostrado a continuación en la Figura 6.11.

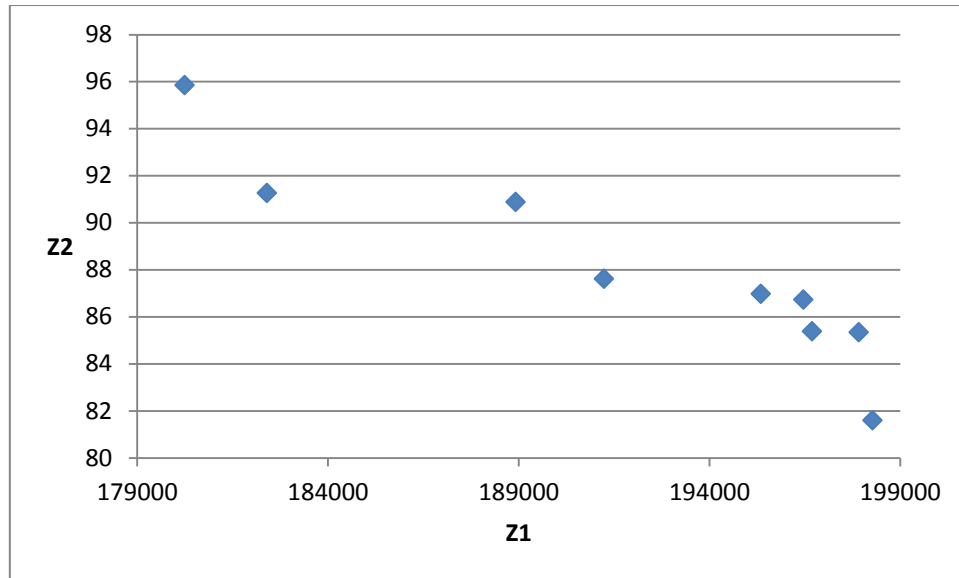


Figura 6.11: Frente Pareto 500 iteraciones

El valor de las funciones objetivos se especifica en la Tabla 6.5 además de otros valores relevantes.

Tabla 6.5: Resultados funciones objetivo 500 iteraciones

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
S1	180245.67	162277.24	14218.42	3750	95.8432	0.95	1
S2	182399.94	166364.08	12585.86	3450	91.2651	0.96	1
S3	188920.72	168113.20	14857.51	5950	90.8754	0.92	1
S4	191239.84	170877.08	16012.75	4350	87.6102	0.94	1
S5	195348.18	174134.36	14613.81	6600	86.9725	0.92	1
S6	196468.75	176118.15	15250.60	5100	86.7282	0.93	1
S7	196694.39	175536.74	15207.65	5950	85.3845	0.92	1
S8	197919.23	174576.20	18143.03	5200	85.3411	0.93	1
S9	198278.55	175222.80	14005.75	9050	81.5875	0.88	1

### 6.5.3.2 Soluciones con 1000 iteraciones

Se ve en este apartado las 12 soluciones no dominadas desprendidas de un proceso de 1000 iteraciones. Las soluciones se muestran en la Figura 6.12 a partir del frente de Pareto obtenido.

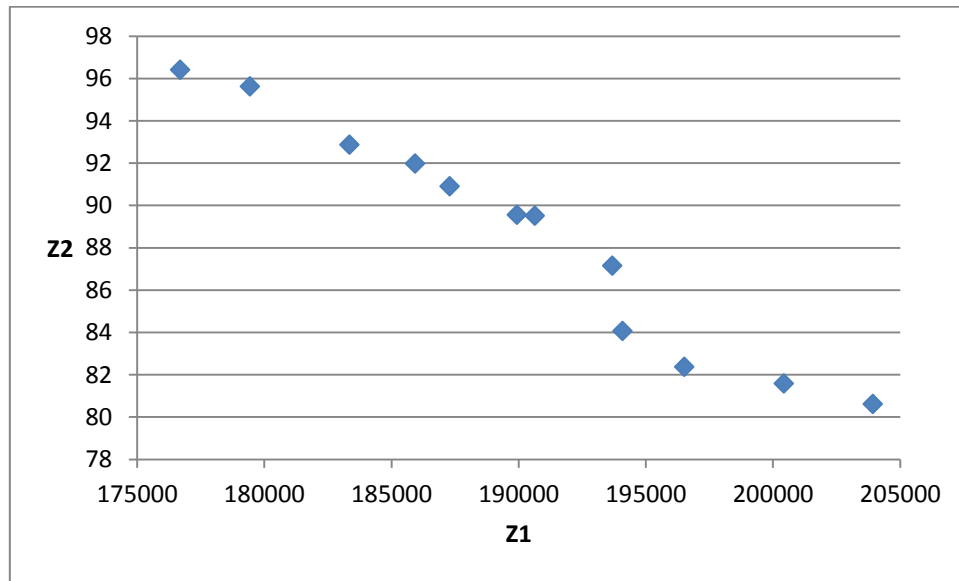


Figura 6.12: Frente Pareto 1000 iteraciones

En dicha figura se muestran los puntos correspondientes a las soluciones no dominadas, se representa a partir del valor de sus funciones objetivo.

En la Tabla 6.6 se puede ver el valor numérico de las funciones objetivo así como otros parámetros importantes que han sido calculados para cada una de las soluciones no dominadas.

Tabla 6.6: Resultados funciones objetivo 1000 iteraciones

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
S1	176691.45	163977.37	11964.08	750	96.4168	0.99	1
S2	179440.33	163052.48	12887.85	3500	95.6270	0.96	1
S3	183347.04	168159.22	13787.82	1400	92.8694	0.98	1
S4	185926.91	167269.30	16057.61	2600	91.9852	0.97	1
S5	187291.55	170296.77	14744.78	2250	90.9104	0.97	1
S6	189937.77	170405.97	12631.79	6900	89.5567	0.91	1
S7	190633.88	170741.90	16191.98	3700	89.5168	0.95	1
S8	193684.75	174849.93	13784.81	5050	87.1580	0.94	1
S9	194085.30	173102.74	16632.56	4350	84.0594	0.94	1
S10	196516.74	173412.56	15454.19	7650	82.3719	0.90	1
S11	200428.04	173739.53	16838.52	9850	81.5862	0.87	1
S12	203930.98	181784.50	15196.48	6950	80.6148	0.91	1

De manera inmediata se observa que aunque las soluciones no son visualmente en el diagrama de Pareto mejores para 1000 iteraciones que para 500, si es verdad que con 1000 iteraciones se cubren rangos de Z1 y Z2 mayores, lo que no hace más que señalar que en un modelo aleatorio como

este, cuantas más veces se buscan soluciones mayor posibilidad de encontrar soluciones no dominadas y buenas existe, así como mayor posibilidad de cubrir rangos mayores.

Como simplemente se desea evaluar la bondad de la implementación realizada en este proyecto, no se analizan procesos con más variaciones del número de iteraciones.

Por lo tanto, para la comparación con otros algoritmos se elige utilizar las soluciones obtenidas con 1000 iteraciones por aportar mayor número de soluciones y rangos mayores de las funciones objetivo.

El resto de datos asociados a estas soluciones son:

S1	<i>Recorridos:</i>	
	{5,4,2,3,6,8,10,11}, {1,2,3,6,8,15,7}, {5,4,12,11,13}, {1,2,3,6,8,10,11,12}, {1,2,3,6,8,15,9}, {9,15,7,10,11}, {5,4,6,15,7}, {1,2,4,5}, {1,2,3,6,8,10,14,13}}	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{27,19,29,38,25,22,13,15,33}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{25,6,5,20,3,12,2,3,23}	
S2	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.89,1.10,0.65,0.96,1.05,0.59,0.95,1.02,0.89}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.92,0.31,0.17,0.52,0.11,0.55,0.11,0.14,0.68}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{12,11,10,14}, {5,4,6,8,10,11}, {1,2,3,6,8,10,11,13}, {12,11,13,14}, {1,2,4,5}, {1,2,3,6,15,7}, {3,2,5,4}, {1,2,3,6,15,9}, {9,15,7,10,11}}	
S2	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{23,23,33,17,15,18,12,24,22}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{8,23,38,3,3,8,2,3,13}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.07,0.81,0.96,0.81,0.94,0.99,0.94,0.99,0.57}	
S2	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.33,0.96,1.14,0.13,0.18,0.4,0.13,0.11,0.55}	

S3	<i>Recorridos:</i>	
	{5,4,6,8,10,7}, {12,11,10,14,13}, {1,2,4,12}, {1,2,3,6,8,10,11,13}, {3,2,4,5}, {1,2,3,6,15,7}, {1,2,5}, {1,2,3,6,15,9}, {9,15,7,10,11}, {3,6,4,12}, {5,4,6,8,10,11}}	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{25,25,21,33,9,18,14,24,22,17,23}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{17,11,3,34,2,6,2,3,7,1,12}	
S4	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.82,1.04,0.91,0.95,0.86,1,1.16,1.02,0.76,1.02,0.79}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.66,0.44,0.13,1.03,0.13,0.30,0.09,0.11,0.29,0.04,0.49}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{5,4,6,8,10,7}, {10,11,12,4}, {12,11,13}, {9,15,7,10,11}, {1,2,3,6,15,9}, {1,2,3,6,8,10,11,13}, {1,2,3,6,15,7}, {4,6,15,9}, {1,2,4,5}, {3,2,5}, {13,14}, {10,14}}	
S5	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{25,25,15,22,24,33,18,15,15,8,2,8}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{23,10,2,6,2,39,6,1,5,1,1,2}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.82,1.03,1.20,0.80,1.17,0.96,0.99,1.14,0.83,1.02,1.25,1.25}	
S5	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.90,0.39,0.08,0.27,0.08,1.16,0.30,0.04,0.29,0.09,0.05,0.20}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{7,10,11,12}, {4,12,11,13}, {1,2,3,6,8,10,11,13}, {5,4,6,3}, {1,2,5}, {1,2,3,6,15,7}, {10,13,14}, {5,4,6,8,15,7,10}, {3,6,15,9}, {1,2,4,12}, {9,15,7,10,11}}	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{22,25,33,11,14,18,12,21,14,21,22}	
S5	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{8,4,37,2,2,6,4,23,2,4,5}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.87,0.97,0.97,1.06,1.24,1.00,1.15,0.94,1.08,0.81,0.96}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.34,0.13,1.10,0.10,0.09,0.30,0.29,1.09,0.10,0.18,0.20}	

S6	<i>Recorridos:</i>	
	{ {7,10,11,12}, {1,2,4,6,3}, {13,11,12,4}, {5,4,6,8,10}, {14,10,13}, {1,2,3,6,8,10,11}, {1,2,3,6,15,7}, {9,15,7,10} }	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{22,18,25,18,18,28,18,17}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{9,7,5,15,9,32,9,6}	
S7	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.96,0.79,1.06,1.00,0.93,0.92,0.98,1.07}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.41,0.36,0.18,0.83,0.50,1.12,0.48,0.33}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{ {1,2,3,6,8,10,11,13}, {5,4,6,8,10,11}, {10,14}, {1,2,5,4,12}, {6,3,2,5}, {12,11,13}, {6,15,9}, {7,10,11,12}, {1,2,3,6,15,7}, {5,4,6,15,7}, {9,15,7,10} }	
S8	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{33,23,8,28,11,15,11,22,18,13,17}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{37,21,2,8,1,2,2,8,6,2,5}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.99,0.79,1.25,0.89,0.86,1.24,1.25,1.08,1.07,1.00,0.86}	
S8	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.12,0.90,0.25,0.27,0.07,0.07,0.11,0.34,0.33,0.10,0.28}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{ {1,2,3,6,8,10,11,13}, {1,2,4,5}, {5,4,6,8,10,11}, {7,10,11,12}, {3,2,4,6,15,7}, {12,11,13,14}, {6,15,9}, {10,14}, {9,15,7,10} }	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{33,15,23,22,14,17,11,8,17}	
S8	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{38,3,23,9,7,2,2,2,5}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.03,1.06,0.79,1.07,1.02,0.92,1.25,1.25,0.86}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.14,0.19,0.97,0.39,0.45,0.11,0.11,0.20,0.28}	

S9	<i>Recorridos:</i>	
	{ {13,11,12}, {1,2,5}, {1,2,3,6,8,10,13}, {9,15,7,10}, {3,2,4,5}, {7,10,11,12}, {6,8,10,11}, {5,4,6,8,10}, {4,2,3,6,8,15,7}, {10,14}, {1,2,4,12,11}, {6,15,9} }	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{15,14,33,17,9,22,15,18,14,8,31,11}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{3,2,30,5,1,14,5,13,8,2,6,2}	
S10	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.93,1.10,1.13,0.92,1.11,0.81,1.12,0.92,0.96,1.25,1.03,1.25}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.14,0.10,0.89,0.25,0.07,0.60,0.28,0.72,0.51,0.25,0.17,0.11}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{ {1,2,3,6,8,10,11,13}, {5,4,6,3}, {10,11,12}, {4,6,8,15,7,10}, {10,14}, {1,2,4,12}, {13,14}, {7,10,11}, {3,6,15,7}, {9,15,7,10}, {1,2,3,6,15,9} }	
S11	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{33,11,15,17,8,21,2,12,8,17,24}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{38,5,7,20,2,6,1,1,2,3,3}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.07,0.77,1.15,1.07,1.25,0.89,1.25,1.25,1.24,1.16,1.18}	
S11	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.14,0.4,0.41,1.16,0.20,0.26,0.05,0.05,0.16,0.18,0.10}	
	<i>Recorridos:</i>	
	{ {1,2,3,6,8,10}, {9,15,7,10}, {3,2,4,5}, {13,11,12}, {13,10,7,15,8}, {1,2,5}, {5,4,6,8,10,11}, {12,4,6,15,7}, {5,4,6,15,7}, {3,6,15,7}, {10,14} }	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{23,17,9,15,21,14,23,19,13,8,8}	
S11	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{26,6,3,5,11,2,24,2,2,2,2}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.13,1.03,0.71,0.92,0.78,1.04,0.91,1.15,0.91,1.19,1.25}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{1.12,0.35,0.26,0.33,0.52,0.11,1.01,0.10,0.12,0.19,0.25}	

S12	<i>Recorridos:</i>	
	{ {3,6,8,10,11}, {5,4,6,8,10,11}, {1,2,3,6,8,15,7,10}, {10,11,13,14}, {10,11,12}, {2,4,6,15,7,10}, {3,2,5}, {5,4,6,15,7}, {6,15,9}, {4,12}, {9,15,7,10} }	
	<i>Tiempo asociado a cada recorrido:</i>	
	{18,23,26,12,15,19,8,13,11,10,17}	
	<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	
	{4,17,31,12,6,6,1,1,2,1,4}	
	<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.91,0.83,1.22,0.88,1.18,1.19,0.90,1.11,1.25,1.25,1.11}	
	<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	
	{0.22,0.73,1.16,0.99,0.41,0.28,0.13,0.03,0.10,0.07,0.18}	

Cabe mencionar, que no se considera ninguna solución mejor que otra ya que todas son soluciones no dominadas, es decir, ninguna mejora en ambas funciones objetivo a alguna de las demás, por lo que la elección de una u otra como solución definitiva queda en función del criterio que se aplique por parte del organismo encargado de realizar la optimización.

#### 6.5.4 Comparación de soluciones obtenidas

Como método de evaluación lo que se hace es comparar los resultados obtenidos por medio de la implementación llevada a cabo en este proyecto y los obtenidos por Baaj y Mahmassani y por Mauttone a partir de sus algoritmos correspondientes.

Para ello, se muestran en la Tabla 6.7 todas las soluciones indicadas en el párrafo anterior para poder comparar de forma rápida y directa todas ellas. Se identifican las soluciones de Baaj y Mahmassani con  $BM_n$ , las de Mauttone con  $M_n$ , y las obtenidas en este proyecto con  $S_n$ .

Los datos representados en dicha tabla correspondientes a las soluciones BM han sido tomados de [4]. Y los correspondientes a las soluciones M se obtienen de la Tesis de Maestría de Mauttone [1].

Salta a la vista en la tabla las pocas soluciones propuestas por Baaj y Mahmassani en comparación con las propuestas por Mauttone o con las obtenidas en este proyecto. Se debe tener en cuenta que el estudio de los primeros se hizo a comienzos de los años noventa, y que por aquel entonces las capacidades y características de los ordenadores no tenían nada que ver y estaban muy por debajo de las que se tienen hoy en día.



Tabla 6.7: Comparativa de soluciones de diversos métodos

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
BM1	205656	168076	20930	16650	89.3	0.79	1
BM2	210632	169101	25931	15600	76.9	0.80	1
BM3	222869	180350	27719	14800	82.2	0.81	1
M1	189280	162534	21647	5100	79.4	0.94	1
M2	190050	162532	22419	5100	79.1	0.94	1
M3	190242	160876	24065	5300	73.7	0.93	1
M4	190790	160889	24601	5300	72.8	0.93	1
M5	191472	161422	24450	5600	68.7	0.93	1
M6	191710	161417	24693	5600	68.6	0.93	1
M7	192100	161409	25091	5600	68.5	0.93	1
M8	193102	161398	26104	9600	68.4	0.93	1
M9	195556	159690	26266	9350	67.6	0.88	1
M10	196860	159329	28180	7400	67.5	0.88	1
M11	196982	161626	27957	9050	66.7	0.91	1
M12	197245	158397	29798	5550	65.5	0.88	1
M13	199167	158160	35457	8450	65.4	0.93	1
M14	199339	159998	30890	8450	64.7	0.89	1
M15	199461	160005	31006	8450	64.7	0.89	1
M16	199557	160014	31092	8450	64.7	0.89	1
M17	199676	160028	31198	8450	64.6	0.89	1
M18	201221	160071	32700	8450	64.4	0.89	1
M19	202295	160113	33732	8450	64.3	0.89	1
S1	176691.45	163977.37	11964.08	750	96.4168	0.99	1
S2	179440.33	163052.48	12887.85	3500	95.6270	0.96	1
S3	183347.04	168159.22	13787.82	1400	92.8694	0.98	1
S4	185926.91	167269.30	16057.61	2600	91.9852	0.97	1
S5	187291.55	170296.77	14744.78	2250	90.9104	0.97	1
S6	189937.77	170405.97	12631.79	6900	89.5567	0.91	1
S7	190633.88	170741.90	16191.98	3700	89.5168	0.95	1
S8	193684.75	174849.93	13784.81	5050	87.1580	0.94	1
S9	194085.30	173102.74	16632.56	4350	84.0594	0.94	1
S10	196516.74	173412.56	15454.19	7650	82.3719	0.90	1
S11	200428.04	173739.53	16838.52	9850	81.5862	0.87	1
S12	203930.98	181784.50	15196.48	6950	80.6148	0.91	1

Las observaciones realizadas sobre estos resultados son:

- Las soluciones tipo S (obtenidas en este proyecto) siguen la tendencia de tener valores de Z1 mucho menores que el resto, y valores de Z2 algo mayores que las BM y bastante mayores que las de M. Esto se debe a que se ha adaptado el algoritmo GRASP de tal forma que use menos viajes con transbordo que el GRASP de Mauttone, haciendo de esta manera que el coste del usuario

baje y el del operador suba. Esto se hace porque no se van a utilizar porcentajes de transbordos muy altos para las rutas interurbanas que se van a estudiar. Debido a ello también se obtienen valores de demanda satisfecha de forma directa en general mayores ( $D_0$ ).

- b) De no haber hecho esas pequeñas modificaciones en el código, es evidente pensar que la mayoría de las soluciones obtenidas por algoritmos GRASP tanto las de este proyecto (S) como las tipo M, dominan a las BM, con lo que se deduce que GRASP es un algoritmo de optimización que mejora al de Baaj y Mahmassani.
- c) La proximidad de las funciones objetivo de las soluciones tipo S a las de las soluciones tipo BM y tipo M, la distribución de las mismas y la coherencia de los resultados hace pensar que la implementación realizada en este proyecto es válida y suficiente para evaluar otras rutas diferentes, sin riesgo de cometer errores importantes, incluso teniendo en cuenta que dicha implementación no incluye el apartado de mejora que si incluye la de Mauttone.

## 6.6 Aplicación del método de optimización para las rutas de Aranda de Duero

### 6.6.1 Unidades generales del problema

Se definen las unidades con las que se va a trabajar en el problema para poder realizar una buena lectura de los resultados desprendidos.

De forma general, solo dos de los datos que se introducen afectan a las unidades aplicadas en el problema. Estos datos serán por una parte la matriz de demanda, y por otro la matriz-origen destino.

Típicamente en estos estudios se suelen utilizar unidades como viajeros/hora para la matriz de demanda y minutos para los costes de los recorridos en la matriz origen-destino, ya que como se ha explicado se implementaron en un principio con la finalidad de ser utilizados para transporte de viajeros en entornos urbanos. El no usar la misma unidad de tiempo en una matriz que en otra obliga a realizar un ajuste en el algoritmo, como se cree que es engorroso no se hará de esta forma. Como este caso es para viajes interurbanos, se ha creído conveniente modificar estas unidades y utilizar viajeros/día como unidades para la matriz de demanda y días como unidad de tiempo en la matriz origen-destino.

De esta forma las unidades de los principales resultados que se devolverán son:

- a) Tiempo asociado a cada recorrido: días.
- b) Frecuencias finales de los autobuses: autobuses/día.
- c) Costo  $Z_1$ : viajeros.
- d) Costo  $Z_2$ : autobuses.

### 6.6.2 Parámetros específicos del problema

Se definen a continuación los parámetros específicos del problema a estudiar, es decir, para el caso de Aranda de Duero. Definiendo los parámetros de entrada necesarios para el algoritmo implementado.

Estos serán:

#### 1- Parámetros del modelo:

- $D_0^{min} = 0,8$ . El 80% de la demanda debe ser satisfecha con viajes directos.
- $D_{01}^{min} = 1$ . Toda la demanda debe ser satisfecha con viajes directos y viajes que solo tengan un transbordo. Como se han dividido las rutas por zonas no tiene sentido aplicar más de un transbordo a ninguna de ellas.
- $f_{min} = 0$ . Como se tienen que analizar rutas actuales, puede que el algoritmo nos indique que una de las rutas no debe realizarse ya que encarece la solución, con lo que devolverá valores próximos a 0 en frecuencias de esas rutas para indicar esta situación.
- $f_{max} = 15$ . No se estima conveniente que para una localidad del tamaño de Aranda de Duero exista alguna ruta con más de 15 viajes diarios a algún destino.
- $CAP = 56$ . Caben 56 personas sentadas en los autobuses. Este dato únicamente se señala para el análisis de las rutas actuales, pero será uno de los parámetros a modificar en el estudio de optimización.
- $LFmax = 1$ . En rutas interurbanas este dato no puede ser mayor a uno ya que no puede viajar gente que no tenga una plaza con asiento asignado.

#### 2- Parámetros de la red: Estos parámetros, como su propio nombre indica, dependen de la ruta que se esté estudiando. Con lo que se definirán para cada una de ellas.

Cabe mencionar que la recopilación de estos datos se ha realizado a través de petición de los mismos a las distintas estaciones ubicadas en las diferentes ciudades y también preguntando a los ayuntamientos. En muchos casos la información recibida no ha sido suficiente o se encontraba incompleta debido a un mal seguimiento por parte de dichas instituciones. Por lo que para completarlos se ha realizado una pequeña adecuación a partir del número de

habitantes de las ciudades, sus pueblos circundantes y la proximidad a otros núcleos importantes de transporte de personas por otros medios.

Las matrices que definen cada uno de los casos que se estudian en un principio no eran matrices simétricas, pero tras revisar los casos se observó que se aproximaban mucho a esa condición, por lo que se actúa sobre ellas haciendo que la cumplan, de tal forma que el trabajo computacional para su optimización se verá claramente simplificado sin afectar esto a los resultados obtenidos.

### 3- *Parámetros de evaluación:*

- $\sigma d = 1,5$ . No se aceptan recorridos cuya longitud sea igual a 1,5 veces el recorrido más corto que una los nodos en cuestión.
- $\sigma t = 1,1$ .
- $pt = 20$ . Se penaliza con 20 min cada transbordo que se realice.
- $\delta F = 0,02$ . El algoritmo de asignación se detiene cuando la máxima diferencia de cada una de las frecuencias de entrada con cada una de las de salida no exceda un 2% las mismas.

Como se tratan de problemas con matrices simétricas se aplica esta condición de las matrices para simplificar los cálculos, ya que los resultados serán igual de claros para el objetivo que se busca haciéndolo de una forma u otra.

De forma general, para el problema estudiado, se dividen las rutas en cuatro grandes grupos por su distribución geográfica. Estos grupos son:

- Rutas Norte.
- Rutas Sur.
- Rutas Este.
- Rutas Oeste.

Se estudia cada una de ellas a partir del apartado 6.6.3.

#### 6.6.3 Rutas Norte

Los nodos que componen la red Norte a estudiar son los marcados en el mapa mostrado en la Figura 6.13.



Figura 6.13: Nodo de la rutas Norte

La correspondencia de cada localidad con su número de nodo es la mostrada a continuación:

- 1- Aranda de Duero.
- 2- Gumiel de Izán.
- 3- Lerma.
- 4- Burgos.
- 5- Bilbao.
- 6- Irún.

#### 6.6.3.1 Parámetros de la red

Los parámetros de la red Norte son:

- $NNodos = 6$ .
- *Matrizcon*: se muestra en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Matriz de conectividad de la red Norte

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	1	1	1
2	1	0	1	1	0	0
3	1	1	0	1	0	0
4	1	1	1	0	1	1
5	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	1	0	0

- *Matrizode*: La matriz origen-destino asociada a esta red en días es la que se muestra en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Matriz origen-destino de la red Norte

	1	2	3	4	5	6
1	0	25/1440	45/1440	75/1440	190/1440	244/1440
2	25/1440	0	34/1440	63/1440	0	0
3	45/1440	34/1440	0	63/1440	0	0
4	75/1440	63/1440	39/1440	0	129/1440	184/1440
5	190/1440	0	0	129/1440	0	0
6	244/1440	0	0	184/1440	0	0

- *Matrizde*: Queda la matriz de demanda en viajeros/día definida tal y como se muestra en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Matriz de demanda de la red Norte

	1	2	3	4	5	6
1	0	30	20	200	60	45
2	30	0	5	10	5	5
3	20	5	0	100	20	15
4	200	10	100	0	200	165
5	60	5	20	200	0	0
6	45	5	15	165	0	0

- $D = 1760$  personas/día.



### 6.6.3.2 Solución para las rutas actuales

La solución obtenida a partir de los datos ofrecidos por las rutas en operación actualmente se puede ver en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Solución actual rutas Norte

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRN1	806.23	155.40	200.83	450	2.5035	0.95	1

El resto de valores asociados a esta solución son:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,2,3,4\}, \{1,4\}, \{1,6\}, \{1,5\}, \{4,6\}, \{4,5\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.068, 0.0526, 0.169, 0.132, 0.128, 0.090\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{98, 75, 244, 190, 184, 129\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{1, 1, 1, 1, 1, 1\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.69, 0.40, 0.85, 0.56, 0.47, 0.57\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{5, 4, 1, 1, 7, 7\}
 \end{array} \right\} SRN1$$

### 6.6.3.3 Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida

Se mantienen todos los datos de entrada definidos en el apartado 6.6.3.2, pero se permite que el algoritmo mejore las frecuencias de salida. La solución devuelta se muestra en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Solución actual optimización de frecuencias rutas Norte

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRN2	861.99	158.24	253.76	450	1.6517	0.95	1

El resto de valores asociados a esta solución son:

$$\text{SRN2} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,2,3,4\}, \{1,6\}, \{1,5\}, \{4,6\}, \{4,5\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.068, 0.169, 0.132, 0.128, 0.090\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{98, 244, 190, 184, 129\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{1, 1, 1, 1, 1\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.72, 0.85, 0.56, 1.09, 0.99\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{7, 1, 2, 3, 4\}
 \end{array} \right.$$

Como análisis comparativo entre esta solución y la anterior, cabe destacar que pese a que el costo ha subido para los usuarios (6.9%), la función  $Z_2$  se ha reducido considerablemente (34%).

También llama la atención la eliminación de uno de los recorridos con respecto a la propuesta inicial que se mostraba en el apartado 6.6.3.2.

#### 6.6.3.4 Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas

Como el número de nodos no es demasiado grande las soluciones no dominadas obtenidas de este proceso no son muchas.

Se aplica el proceso con 500 iteraciones para poder obtener las soluciones óptimas.

Las soluciones no dominadas obtenidas en el proceso son las mostradas en la tabla 6.13.

Tabla 6.13: Soluciones no dominadas en rutas Norte con generación de rutas

Id	Z1	$\sum t_{vij} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{eij} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{tij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRN3	367.70	161.08	156.62	50	1.5667	0.99	1
SRN4	777.24	154.06	273.19	350	1.5069	0.96	1

El resto de parámetros asociados a estas rutas son:



SRN3	{	<i>Recorridos:</i>	$\{\{1,2,3,4,5\}, \{1,3,4,6\}\}$
		<i>Tiempo asociado a cada recorrido (días):</i>	$\{0.1576, 0.1861\}$
		<i>Tiempo asociado a cada recorrido (min):</i>	$\{227, 268\}$
		<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	$\{1, 1\}$
		<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	$\{0.85, 0.84\}$
		<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	$\{6, 5\}$
SRN4	{	<i>Recorridos:</i>	$\{\{1,4,5\}, \{1,4,6\}, \{1,2,3\}, \{3,4,5\}\}$
		<i>Tiempo asociado a cada recorrido (días):</i>	$\{0.1417, 0.1799, 0.0410, 0.1167\}$
		<i>Tiempo asociado a cada recorrido (min):</i>	$\{204, 259, 59, 168\}$
		<i>Número de autobuses en cada recorrido:</i>	$\{1, 1, 1, 1\}$
		<i>Ocupación de los buses en cada recorrido:</i>	$\{0.94, 0.86, 0.86, 0.90\}$
		<i>Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:</i>	$\{3, 4, 1, 3\}$

Se puede ver de forma evidente que ambas soluciones dominan a cualquiera de las dos propuestas en los dos apartados anteriores. Con lo que se deduce que el funcionamiento del algoritmo es bueno y devuelve soluciones del problema optimizadas.

La elección entre alguna de estas dos soluciones propuestas ya depende de los criterios en cuanto a costes asignados a usuarios o coste asignado a los operadores.

#### 6.6.3.5 Soluciones con modificación de parámetros

El parámetro que se modifica para obtener nuevas soluciones es CAP, se han efectuado pruebas modificando las capacidades de los autobuses que operan, las pruebas han sido:

- CAP=18. Simulando el uso de microbuses. Todas las soluciones no dominadas devueltas por el algoritmo eran dominadas por las que se han obtenido en el apartado anterior de este trabajo.
- CAP=35. Simulando un autobús de tamaño mediano. También todas las soluciones no dominadas que se devuelven están

dominadas por las obtenidas en el apartado anterior.

Mencionar que para obtener estas soluciones también se han dejado libres las frecuencias mínima y máxima a obtener en las soluciones ya que al usar autobuses de menor capacidad es inmediato deducir que las frecuencias aumentan.

En cualquier caso con las modificaciones en los parámetros efectuadas no se ha conseguido obtener soluciones no dominadas por las obtenidas en puntos anteriores, por lo que no se incluyen en este apartado ya que no aportarían información relevante.

#### 6.6.4 Rutas Sur

Los nodos que componen la red Sur a estudiar son los marcados en el mapa que se muestra a continuación en la Figura 6.14:



**Figura 6.14: Nodos de la rutas Sur**

La correspondencia de cada localidad con su número de nodo es la siguiente:

- 1- Aranda de Duero.
- 2- Sepúlveda.
- 3- Segovia.
- 4- Madrid.
- 5- Tarifa.

#### 6.6.4.1 Parámetros de la red

Los parámetros de la red Sur son:

- $NNodos = 5$ .
- *Matrizcon*: Mostrada en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14: Matriz de conectividad de la red Sur

	1	2	3	4	5
1	0	1	1	1	0
2	1	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1
5	0	0	0	1	0

- *Matrizode*: La matriz origen-destino asociada a esta red en días es la que se muestra en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15: Matriz origen-destino de la red Sur

	1	2	3	4	5
1	0	50/1440	105/1440	150/1440	0
2	50/1440	0	75/1440	110/1440	0
3	105/1440	75/1440	0	85/1440	0
4	150/1440	110/1440	85/1440	0	480/1440
5	0	0	0	480/1440	0

- *Matrizde*: Queda la matriz de demanda en viajeros/día tal y como se puede observar en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16: Matriz de demanda de la red Sur

	1	2	3	4	5
1	0	20	70	250	5
2	20	0	40	220	5
3	70	40	0	175	5
4	250	220	175	0	40
5	5	5	5	40	0

- $D = 1660$  personas/día.

#### 6.6.4.2 Solución para las rutas actuales

La solución obtenida a partir de los datos ofrecidos por las rutas en operación actualmente es la que se muestra en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17: Solución rutas actuales rutas Sur

Id	Z1	$\sum t_{vij} \cdot d_{ij}$	$\sum te_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum tt_{ij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRS1	2453.13	165.63	287.5	2000	2.0069	0.94	1

El resto de valores asociados a esta solución son:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,4\}, \{1,4,5\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,4\}, \{3,4\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.1042, 0.4375, 0.0347, 0.0729, 0.0764, 0.0590\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{150, 630, 50, 105, 110, 85\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{1, 1, 1, 1, 1, 1\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.56, 0.81, 1.07, 0.98, 1.00, 0.54\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{7, 1, 1, 2, 4, 6\}
 \end{array} \right\} \text{SRS1}$$

#### 6.6.4.3 Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida

Se mantienen todos los datos de entrada pero se permite que el algoritmo mejore las frecuencias de salida. La solución devuelta queda expuesta en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18: Solución actual optimización de frecuencias rutas Sur

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRS2	2486.88	165.63	321.25	2000	1.5764	0.94	1

El resto de valores que se asocian a esta solución son:

SRS2	Recorridos:
	$\{\{1,4\}, \{1,4,5\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,4\}, \{3,4\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.1042, 0.4375, 0.0347, 0.0729, 0.0764, 0.0590\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{150, 630, 50, 105, 110, 85\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
	$\{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.89, 0.98, 1.00, 0.98, 1.00, 0.80\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{5, 1, 1, 2, 4, 4\}$

Como análisis comparativo entre esta solución y la anterior, cabe destacar que pese a que el costo ha subido para los usuarios (1,3%), la función  $Z_2$  se ha reducido considerablemente (27,38%).

#### 6.6.4.4 Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas

En este apartado se generan nuevos recorridos y se asocian frecuencias adecuadas, es decir, se diseña una nueva red al completo.

Como el número de nodos no es muy grande las soluciones no dominadas obtenidas de este proceso no son muchas.

Se aplica el proceso con 500 iteraciones para poder obtener las soluciones óptimas.

Las soluciones no dominadas obtenidas en el proceso son las mostradas en la Tabla 6.19.

Tabla 6.19: Soluciones no dominadas en rutas Sur con generación de rutas

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRS3	270.42	200	70.42	0	5.65	1	1
SRS4	759.96	173.82	186.15	400	2.4315	0.99	1

El resto de parámetros asociados a estas rutas son:

SRS3	Recorridos:	$\{\{1,2,3,4,5\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):	$\{0.4792\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):	$\{690\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:	$\{6\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:	$\{0.625\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:	$\{12\}$
SRS4	Recorridos:	$\{\{1,2,4\}, \{1,2,3\}, \{3,4,5\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):	$\{0.1111, 0.1076, 0.3924\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):	$\{160, 155, 565\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:	$\{1, 1, 2\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:	$\{0.78, 0.70, 0.65\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:	$\{9, 2, 3\}$

En este proceso no se han encontrado soluciones que dominen a las anteriormente obtenidas, con lo que la elección de unas u otras dependerá de los criterios en los que se base la misma.

#### 6.6.4.5 Soluciones con modificación de parámetros

Se modifican los valores de CAP. Se han efectuado pruebas modificando las capacidades de los autobuses que operan, las pruebas han sido:

- a) CAP=18. Simulando el uso de microbuses. Nos devuelve una solución que no es dominada por las obtenidas anteriormente, se puede ver esta solución en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20: Soluciones rutas Sur con CAP = 18

Id	Z1	$\sum t_{vij} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{ej} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{tij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRS5	222.64	200	22.64	0	17.5702	1	1



El resto de parámetros asociados a esta solución son:

$$\text{SRS5} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,2,3,4,5\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.4792\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{690\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{18\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.625\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{37\}
 \end{array} \right.$$

Como era de esperar, aunque disminuye algo el costo para los usuarios, el costo para los operadores se dispara.

- b) CAP=35. Simulando un autobús de tamaño mediano. Para este caso las dos soluciones son no dominadas por ninguna de las anteriores. Se muestran las soluciones en la Tabla 6.21.

Tabla 6.21: Soluciones rutas Sur con CAP = 35

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRS6	244.02	200	44.02	0	9.0357	1	1
SRS7	690.16	173.82	116.34	400	3.8904	0.99	1

El resto de parámetros asociados a estas soluciones son:

$$\text{SRS6} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,2,3,4,5\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.4792\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{690\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{9\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.625\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{19\}
 \end{array} \right.$$

SRS7	Recorridos:
	$\{\{1,2,4\}, \{1,2,3\}, \{3,4,5\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.1111, 0.1076, 0.3924\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{160, 155, 565\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
	$\{2, 1, 2\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.78, 0.70, 0.65\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{14, 3, 5\}$

Mencionar que para obtener estas soluciones también se han dejado libres las frecuencias mínima y máxima a obtener en las soluciones ya que al usar autobuses de menor capacidad es inmediato deducir que las frecuencias aumentarían.

Como para las rutas Sur no se han obtenido soluciones que dominen unas a otras, se deberá escoger una u otra en base a los criterios que en cada momento se consideren oportunos. Se muestra en la Figura 6.15 el frente de Pareto generado por estas 7 soluciones.

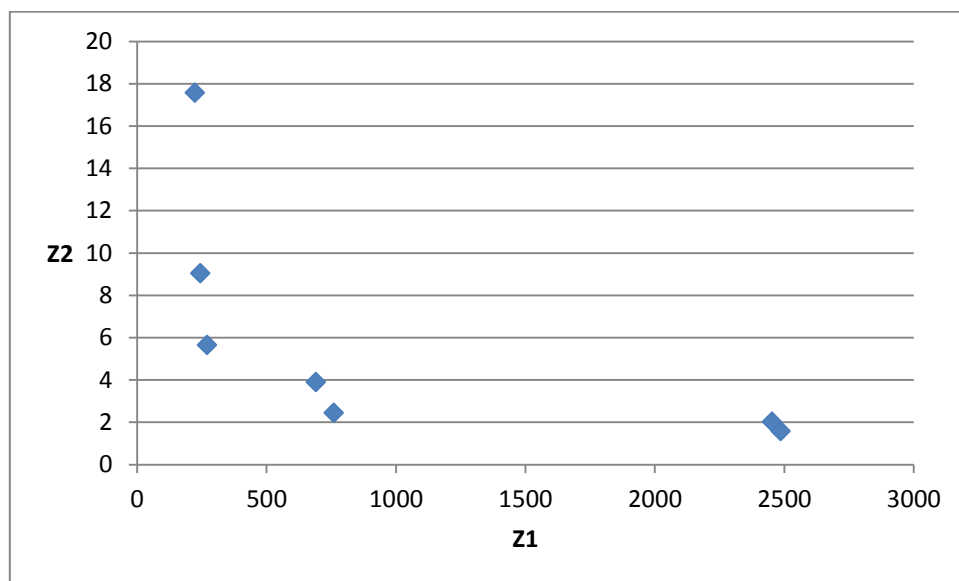


Figura 6.15: Frente de Pareto soluciones rutas Sur

Como se puede ver las soluciones alcanzadas durante todo este apartado generan un frente de Pareto que se aproxima mucho a los ejes de la gráfica, con lo que se puede deducir que se trata de un frente de Pareto optimizado.



### 6.6.5 Rutas Este

Los nodos que componen la red Este a estudiar serán los marcados en el mapa que se muestra en la Figura 6.16.



Figura 6.16: Nodos de la rutas Este

La correspondencia de cada localidad con su número de nodo es:

- 1- Aranda de Duero.
- 2- Caleruega.
- 3- Huerta del Rey.
- 4- Salas de los Infantes.
- 5- El Burgo de Osma.
- 6- Soria.
- 7- Zaragoza.
- 8- Barcelona.

#### 6.6.5.1 Parámetros de la red

Los parámetros de la red Este son:

- $NNodos = 8$ .
- *Matrizcon*: Se muestra en la Tabla 6.22.

Tabla 6.22: Matriz de conectividad de la red Este

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	1	0	0	0	0	0
3	1	1	0	1	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	1	0	0
5	1	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	1	1	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1	0	1
8	1	0	0	0	0	0	1	0

- *Matrizode*: La matriz origen-destino asociada a esta red en días es la que se puede ver en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23: Matriz origen-destino de la red Este

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	35/1440	55/1440	90/1440	55/1440	100/1440	225/1440	450/1440
2	35/1440	0	25/1440	0	0	0	0	0
3	55/1440	25/1440	0	38/1440	0	0	0	0
4	90/1440	0	38/1440	0	0	85/1440	0	0
5	55/1440	0	0	0	0	58/1440	0	0
6	100/1440	0	0	85/1440	58/1440	0	139/1440	0
7	225/1440	0	0	0	0	139/1440	0	243/1440
8	450/1440	0	0	0	0	0	243/1440	0

- *Matrizde*: Queda la matriz de demanda en viajeros/día como muestra la Tabla 6.24.

Tabla 6.24: Matriz de demanda de la red Este

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	6	5	7	5	25	50	50
2	50	0	2	2	0	0	0	0
3	105	2	0	2	0	0	0	0
4	150	2	2	0	0	5	0	0
5	5	0	0	0	0	20	5	0
6	25	0	0	5	20	0	50	30
7	50	0	0	0	5	50	0	125
8	50	0	0	0	0	30	125	0

- $D = 878$  personas/día.

#### 6.6.5.2 Solución para las rutas actuales

La solución obtenida a partir de los datos ofrecidos por las rutas en operación actualmente sin utilizar el algoritmo de optimización se muestra en la Tabla 6.25.

Tabla 6.25. Solución rutas actuales rutas Este

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum te_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum tt_{ij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRE1	1682.56	160.06	122.5	1400	2.5660	0.92	1

El resto de valores de la solución son:

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Recorridos:} \\ \{ \{1,2,3,4\}, \{1,5,6,7\}, \{1,8\}, \{6,7\}, \{7,8\} \} \\ \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\ \{0.0681, 0.1570, 0.3125, 0.0965, 0.1688\} \\ \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\ \{98, 252, 450, 139, 243\} \\ \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\ \{1, 1, 1, 1, 1\} \\ \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\ \{0.12, 0.44, 0.45, 0.24, 0.73\} \\ \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\ \{3, 4, 2, 2, 5\} \end{array}$$

### 6.6.5.3 Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida

En este apartado se mantienen todos los datos de entrada pero se permite que el algoritmo mejore las frecuencias de salida. La solución devuelta se puede ver en la Tabla 6.26.

Tabla 6.26: Solución actual optimización de frecuencias rutas Este

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum te_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum tt_{ij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRE2	1737.73	144.14	193.58	1400	1.5806	0.92	1

Como análisis comparativo entre esta solución y la mostrada en el apartado 6.6.5.2, cabe destacar que pese a que el costo ha subido para los usuarios (3,2%), la función  $Z_2$  se ha reducido considerablemente (62.6%). Valor muy considerable teniendo en cuenta lo bajo que es el crecimiento de la función  $Z_1$ .

El resto de valores de la solución son:

SRE2	Recorridos:
	$\{\{1,2,3,4\}, \{1,5,6,7\}, \{1,8\}, \{7,8\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.0681, 0.1750, 0.3125, 0.1688\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{98, 252, 450, 243\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
	$\{1, 1, 1, 1\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.36, 0.64, 0.89, 0.92\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{1, 3, 1, 4\}$

También llama la atención la eliminación de uno de los recorridos con respecto a la propuesta inicial de las rutas. Este se muestra en el apartado 6.6.5.2.

#### 6.6.5.4 Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas

En este apartado se crean nuevos recorridos y se ajustan las frecuencias, es decir se aplica al completo el algoritmo implementado. Como el número de nodos no es demasiado grande las soluciones no dominadas obtenidas de este proceso no son muchas.

Se aplica el proceso con 500 iteraciones para poder obtener las soluciones óptimas.

Las soluciones no dominadas obtenidas en el proceso son las que figuran en la Tabla 6.27.

Tabla 6.27: Soluciones no dominadas en rutas Este con generación de rutas

Id	Z1	$\sum t_{vij} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{eij} \cdot d_{ij}$	$\sum t_{tij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRE3	509.01	147.27	161.75	200	1.5932	0.99	1
SRE4	797.64	143.52	254.12	400	1.4805	0.98	1

El resto de parámetros obtenidos asociados a estas rutas se ven a continuación:

SRE3	Recorridos:
	$\{\{1,2,3,4\}, \{1,5,6,7,8\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.0681, 0.3438\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{98, 495\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
SRE4	$\{1, 2\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.87, 0.72\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{1, 5\}$
	Recorridos:
	$\{\{1,2,3,4\}, \{1,7,8\}, \{1,5,6\}, \{6,7,8\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.0681, 0.3250, 0.0785, 0.2653\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{98, 468, 113, 382\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
	$\{1, 1, 1, 1\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.87, 0.82, 0.82, 0.93\}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{1, 3, 1, 2\}$

Como consecuencia de este proceso se ve que la SRE3 domina a la SRE1. Con lo que hasta el momento se han obtenido 3 soluciones no dominadas: SRE2, SRE3 y SRE4.

#### 6.6.5.5 Soluciones con modificación de parámetros

El parámetro que se modifica es CAP. A partir de estas modificaciones se han efectuado pruebas con distintas capacidades en los autobuses que operan, las pruebas han sido:

- CAP=18. Simulando el uso de microbuses. Todas las soluciones no dominadas devueltas por el algoritmo eran dominadas por las que se han obtenido en el apartado anterior.
- CAP=35. Simulando un autobús de tamaño mediano. También todas las soluciones no dominadas que se devuelven están dominadas por las obtenidas en el apartado anterior.

Mencionar que para obtener estas soluciones también se han dejado libres las frecuencias mínima y máxima a obtener en las soluciones ya que al usar autobuses de menor capacidad es inmediato deducir que las frecuencias

aumentan.

Como para las rutas Sur no se tienen soluciones que dominen unas a otras, se deberá escoger en base a los criterios que en cada momento se consideren oportunos.

### 6.6.6 Rutas Oeste

Los nodos que componen la red Oeste a estudiar serán los marcados en el mapa mostrado en la Figura 6.17.

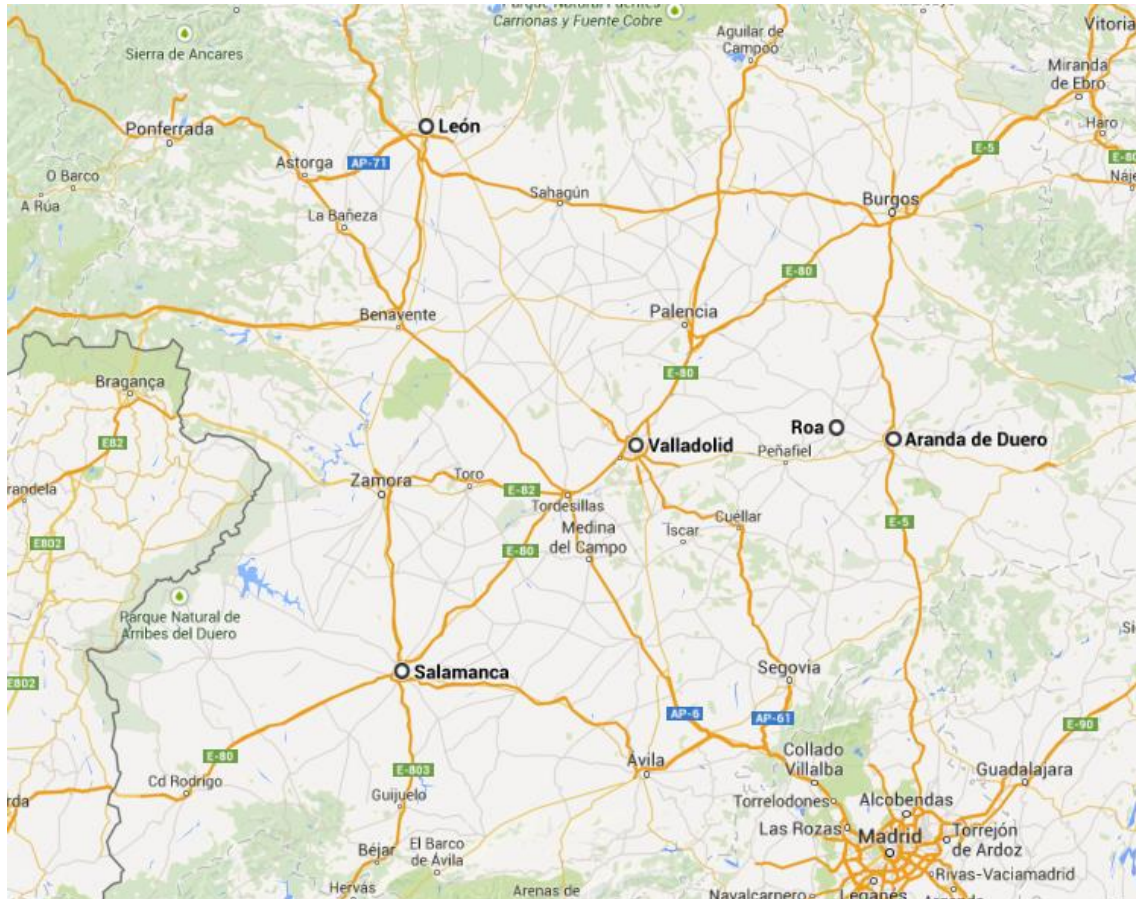


Figura 6.17: Nodos de la rutas Oeste

Para aplicarlo en el algoritmo cada localidad debe ir asociada a un número de nodo. En este caso, la correspondencia de cada localidad con su número de nodo es la siguiente:

- 1- Aranda de Duero.
- 2- Roa.
- 3- Valladolid.
- 4- León.
- 5- Salamanca.



### 6.6.6.1 Parámetros de la red

Los parámetros de la red Oeste son:

- $NNodos = 5$ .
- *Matrizcon*: Es la que se puede ver en la Tabla 6.28.

Tabla 6.28: Matriz de conectividad de la red Oeste

	1	2	3	4	5
1	0	1	1	1	1
2	1	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1
5	1	0	0	1	0

- *Matrizode*: La matriz origen-destino asociada a esta red en días es la que se visualiza en la Tabla 6.29.

Tabla 6.29: Matriz origen-destino de la red Oeste

	1	2	3	4	5
1	0	33/1440	95/1440	185/1440	160/1440
2	33/1440	0	85/1440	0	0
3	95/1440	85/1440	0	128/1440	92/1440
4	185/1440	0	128/1440	0	0
5	160/1440	0	92/1440	0	0

- *Matrizde*: Queda la matriz de demanda en viajeros/día tal y como se observa en la Tabla 6.30.

Tabla 6.30: Matriz de demanda de la red Oeste

	1	2	3	4	5
1	0	90	350	10	12
2	90	0	18	0	0
3	350	18	0	120	200
4	10	0	120	0	0
5	12	0	200	0	0

- $D = 1600$  personas/día.

### 6.6.6.2 Solución para las rutas actuales

La solución obtenida a partir de los datos ofrecidos por las rutas en operación actualmente se puede ver en la Tabla 6.31.

Tabla 6.31: Solución rutas actuales rutas Oeste

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRO1	234.27	112.69	121.58	0	2.0118	1	1

El resto de valores de la solución son:

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,2,3\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{1,4\}, \{1,5\}, \{3,5\}, \{3,4\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.0819, 0.0229, 0.0660, 0.1285, 0.1111, 0.0639, 0.0889\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{118, 33, 95, 185, 160, 92, 128\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.66, 0.15, 0.57, 0.18, 0.11, 0.60, 0.54\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{8, 3, 3, 1, 2, 6, 4\}
 \end{array} \right\} SRO1
 \end{array}$$

### 6.6.6.3 Solución para las rutas actuales con optimización de frecuencias de salida

En este apartado se mantienen todos los datos de entrada pero se permite que el algoritmo mejore las frecuencias de salida. La solución devuelta se puede ver en la Tabla 6.32.

Tabla 6.32: Solución actual optimización de frecuencias rutas Oeste

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRO2	284.99	115.74	169.25	0	1.4174	1	1

El resto de valores asociados a esta solución son:



SRO2	Recorridos:
	$\{\{1,2,3\}, \{1,4\}, \{1,5\}, \{3,5\}, \{3,4\}\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
	$\{0.0819, 0.1285, 0.1111, 0.0639, 0.0889\}$
	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
	$\{118, 185, 160, 92, 128\}$
	Número de autobuses en cada recorrido:
	$\{1, 1, 1, 1, 1\}$
	Ocupación de los buses en cada recorrido:
	$\{0.90, 0.20, 0.22, 1, 1, \}$
	Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
	$\{8, 1, 1, 4, 3\}$

Como análisis comparativo entre esta solución y la anterior, cabe destacar que aumenta algo el costo para los usuarios (21%), y que la función  $Z_2$  se ha reducido considerablemente (41%). Sin embargo, no parecen ser las soluciones óptimas a este problema.

También llama la atención la eliminación de dos recorridos con respecto a la propuesta inicial.

#### 6.6.6.4 Soluciones no dominadas con generación de rutas nuevas

Como el número de nodos no es muy grande las soluciones no dominadas obtenidas de este proceso no son muchas.

Se aplica el proceso con 500 iteraciones para poder obtener las soluciones óptimas.

Las soluciones no dominadas obtenidas en el proceso son las mostradas en la Tabla 6.33.

Tabla 6.33: Soluciones no dominadas en rutas Oeste con generación de rutas

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum te_{ij} \cdot d_{ij}$	$\sum tt_{ij} \cdot d_{ij}$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRO3	267.69	111.44	156.25	0	1.2028	1	1
SRO4	680.71	111.12	169.58	400	1.1139	0.99	1
SRO5	1930.61	106.61	224	1600	0.9519	0.95	1

El resto de parámetros asociados a estas soluciones son:



SR03	{	Recorridos:
		$\{\{1,3,5\}, \{1,2,3,4\}\}$
		Tiempo asociado a cada recorrido (días):
		$\{0.1299, 0.1708\}$
		Tiempo asociado a cada recorrido (min):
		$\{187, 246\}$
		Número de autobuses en cada recorrido:
SR04	{	$\{1, 1\}$
		Ocupación de los buses en cada recorrido:
		$\{0.89, 0.90\}$
		Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
		$\{4, 4\}$
		Recorridos:
		$\{\{1,2,3\}, \{1,3,5\}, \{3,4\}\}$
SR05	{	Tiempo asociado a cada recorrido (días):
		$\{0.0819, 0.1299, 0.0889\}$
		Tiempo asociado a cada recorrido (min):
		$\{118, 187, 128\}$
		Número de autobuses en cada recorrido:
		$\{1, 1, 1\}$
		Ocupación de los buses en cada recorrido:
	{	$\{1, 0.91, 0.77\}$
		Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
		$\{4, 4, 3\}$
		Recorridos:
		$\{\{1,3\}, \{3,5\}, \{1,2\}, \{3,4\}\}$
		Tiempo asociado a cada recorrido (días):
		$\{0.0660, 0.0639, 0.0229, 0.0889\}$
	{	Tiempo asociado a cada recorrido (min):
		$\{95, 92, 33, 128\}$
		Número de autobuses en cada recorrido:
		$\{1, 1, 1, 1\}$
		Ocupación de los buses en cada recorrido:
		$\{1, 1, 1, 1\}$
		Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:
		$\{7, 4, 2, 3\}$

Se ve que la primera solución obtenida en este proceso domina a las de los dos apartados anteriores, pero se obtienen también otras dos soluciones más que no son dominadas por esta, con lo que la elección de unas u otras dependerá de los criterios en los que se base la misma.

#### 6.6.6.5 Soluciones con modificación de parámetros

Se modifican las capacidades de los autobuses en este apartado. Se

han efectuado varias pruebas que se explican a continuación:

- c) CAP=18. Simulando el uso de microbuses. Devuelve una solución que no es dominada por las obtenidas anteriormente, se puede ver esta solución en la Tabla 6.34.

Tabla 6.34: Soluciones rutas Oeste con CAP = 18

Id	Z1	$\sum tv_{ij} \cdot dij$	$\sum te_{ij} \cdot dij$	$\sum tt_{ij} \cdot dij$	Z2	$D_0$	$D_{01}$
SRO6	166.01	111.69	54.32	0	3.4785	1	1

El resto de valores asociados a esta solución son:

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{Recorridos:} \\
 \{ \{1,3,5\}, \{1,2,3,4\} \} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (días):} \\
 \{0.1299, 0.1708\} \\
 \text{Tiempo asociado a cada recorrido (min):} \\
 \{187, 246\} \\
 \text{Número de autobuses en cada recorrido:} \\
 \{2, 2\} \\
 \text{Ocupación de los buses en cada recorrido:} \\
 \{0.99, 0.96\} \\
 \text{Frecuencias finales de los buses en cada recorrido:} \\
 \{11, 12\}
 \end{array} \right\} SRO6
 \end{array}$$

Como era de esperar, aunque disminuye algo el costo para los usuarios, el costo para los operadores aumenta notablemente, en cualquier caso aporta una solución no dominada.

- d) CAP=35. Simulando un autobús de tamaño mediano. Todas las soluciones obtenidas en este proceso son dominadas por alguna de las anteriores con lo que no se incluyen ya que no aportan información relevante.

Mencionar que para obtener estas soluciones también se han dejado libres las frecuencias mínima y máxima a obtener en las soluciones ya que al usar autobuses de menor capacidad es inmediato deducir que las frecuencias aumentarían.

Como para las rutas Oeste no se tienen soluciones que dominen unas a otras, si no que se dan un total de 4 soluciones no dominadas, se deberá escoger la deseada en base a los criterios que en cada momento se consideren oportunos. Se muestra en la Figura 6.18 el frente de Pareto generado por estas 4 soluciones.

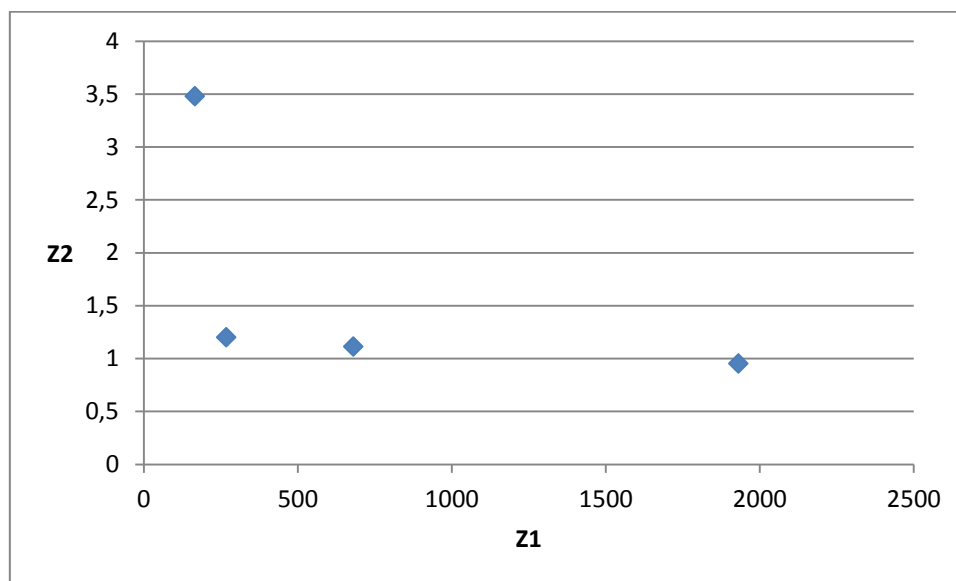


Figura 6.18: Frente de Pareto soluciones rutas Oeste

### 6.6.7 Conclusiones

La conclusión principal de todo el estudio desarrollado en el apartado 6.6 es que para todos los grupos de rutas estudiados (Norte, Sur, Este y Oeste) se han alcanzado soluciones que dominan y por lo tanto mejoran a las que hasta el momento están funcionando en la terminal de Aranda de Duero.

Debido a lo explicado en el apartado anterior se puede concluir que el algoritmo implementado es válido para rutas interurbanas y devuelve soluciones optimizadas, aunque se haya tomado como base el análisis de rutas urbanas. Esto no quiere decir que el algoritmo no pueda incluir mejoras adaptadas a estudios de tipo interurbanos que hagan que se puedan obtener soluciones mejores incluso que las obtenidas en este Proyecto Fin de Carrera.

Estas mejoras obtenidas suponen un ahorro en diferentes ámbitos asociados al transporte por carretera. Ahorro en cuanto al coste para los usuarios, ahorro en el coste para las compañías de transporte, reducción en contaminación y ser más responsables con el medio ambiente y además en muchos casos se reduce el tiempo de viaje. Por lo que se entiende que es un análisis muy a tener en cuenta a la hora de programar rutas de transporte de transporte de personas por carretera.

## **7 ANÁLISIS DE LA RED PRÓXIMA A LA TERMINAL**

## 7.1 Estudio del tráfico y de los efectos inducidos por la implantación de la terminal.

En este punto se pasa a estudiar el tráfico actual en la zona de ubicación de la nueva terminal, analizando los posibles impactos sobre este tráfico que pudiera generar, y se desarrollan algunas medidas correctoras de tal forma que se mejore la circulación. Posteriormente se ve y comprueba la eficacia de dichas medidas por medio de simulaciones de tráfico.

### 7.1.1 Herramienta Aimsun

Se va a proceder a la creación de la red del entorno de la terminal para poder realizar más tarde un análisis del tráfico actual en el entorno de la nueva terminal. Para ello se utiliza como herramienta informática fundamental Aimsun, que permite obtener una serie de resultados que describirán en detalle esta situación.

Aimsun es un software integrado de modelado de transporte, desarrollado y puesto a la venta por TSS – Transport Simulation Systems. Es utilizado por agencias gubernamentales, universidades y consultorías alrededor de todo el mundo. Engloba campos como la ingeniería del tráfico, simulaciones, planeo de transporte y estudios de evacuaciones de emergencia. Se usa además entre otras cosas para la mejora de infraestructuras reducción de emisiones y congestiones en el tráfico urbano.

En este caso se va a realizar una representación del área circundante en la proximidad de la estación de autobuses de Aranda de Duero, y se crea una simulación del tráfico de la zona para poder realizar el estudio, basándose el mismo siempre en datos recogidos en la propia zona de conflicto.

Antes de nada cabe explicar que se analiza la red en las dos situaciones más conflictivas a lo largo del día, que será en las horas punta, esto se corresponde con la hora de entrar al trabajo por la mañana, el periodo a analizar es entre 08:00 y las 09:00 de la mañana, y el de salida de los trabajos por la tarde para regresar a las casas, el periodo que se analiza cómo hora p es de 18:00 a 19:00.

Se estima que estos son los periodos de hora punta debido a un estudio realizado in situ del tráfico. Realizando una recogida de datos de la forma más exhaustiva posible por medio de fichas de análisis, en las diferentes intersecciones. En la Tabla 7.1 se muestra un ejemplo del tipo de tablas de análisis utilizadas.

Tabla 7.1: Ejemplo ficha de análisis de tráfico

Intersección	Calle		Sentido	Horas		Livianos	Pesados
	Sale	Entra		Inicio	Fin		

#### 7.1.1.1 Generación del modelo con Aimsun

En primer lugar se debe especificar el tipo de problema que se quiere evaluar mediante el programa, esto se hace en función de la finalidad que se tenga, como lo que se busca es editar un modelo, o crearlo de cero, el tipo de problema que se sigue es uno de edición.

En estos problemas de edición, el objetivo final es la creación de una red completa desde cero con todos los datos necesarios para acabar realizando una simulación microscópica de la red.

El programa aporta tres posibilidades:

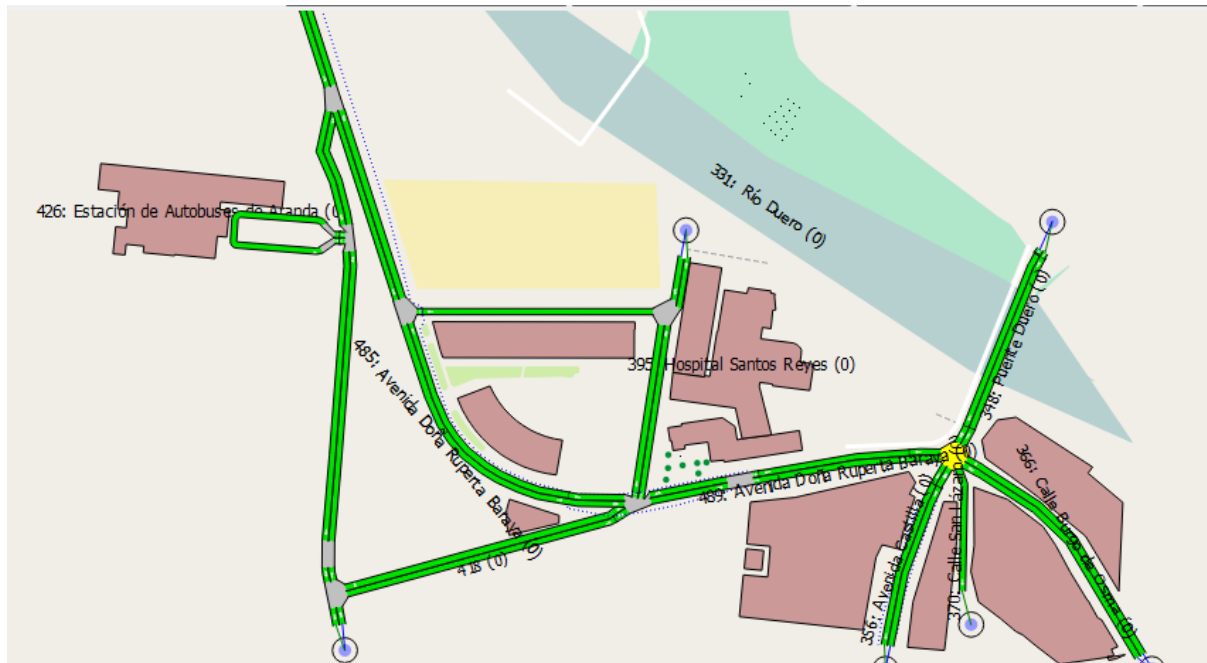
- Definir, paso a paso, y basándose en una imagen de fondo, todos los elementos gráficos que componen la red, incluyendo secciones, nodos, detectores, paneles de señalización variable, líneas continuas, etc.
- Importar una base cartográfica desde AutoCAD o Gis y a partir de esta generar la red en cuestión.
- Importar desde internet la red sobre la que se desea trabajar desde Open Street Maps. Es una opción muy completa en la que se importan todas y cada una de las carreteras e intersecciones, así como ubicaciones de edificios, habría que trabajar sobre las intersecciones para ajustar su modo de operar.

Por lo que la secuencia de acciones a realizar en un problema de este

tipo será definir un plan de control para los semáforos, un estado de tráfico, los centroides, una demanda de tráfico, y un escenario con un experimento que se utilizará finalmente para una simulación lo más aproximada posible a la real. Se ve todo este proceso a seguir en los siguientes párrafos.

Como punto de partida hay que centrarse en la generación de la red, y debido a las ventajas comentadas anteriormente en el apartado c), se hace importándola desde Open Street Maps, buscando la zona de manera manual sobre el mapa general, dentro de la zona que se desea importar: país, provincia, ciudad, sector.

Se ve en la Figura 7.1 una imagen extraída del propio programa en la que se puede ver la distribución de la red actual, en la que se especifican los nombres de las principales calles, así como también de algunos edificios, el Hospital Santos Reyes y la ubicación de la terminal actual, y también la ubicación del río delimitando el espacio por la zona Norte.



**Figura 7.1: Red actual zona próxima a la estación**

En cuanto a las intersecciones, las señaladas en color gris se rigen por criterios de señalización vertical como stop o ceda el paso. La intersección marcada en amarillo se regula mediante señalización luminosa por medio de semáforos.

#### 7.1.1.2 Plan de control de semáforos

Como primer paso antes de crear los tiempos de regulación de luces, se deben crear los grupos de señal, es decir distribuir en cuantos grupos se reparte la señalización de la intersección. Normalmente cada posible alternativa



se coloca en un grupo diferente al resto, a no ser que alguno no entre en conflicto con otra y se les quieran aplicar la misma distribución.

En este caso únicamente se tiene una intersección regulada por semáforos, los grupos generados se especifican en la Figura 7.2.

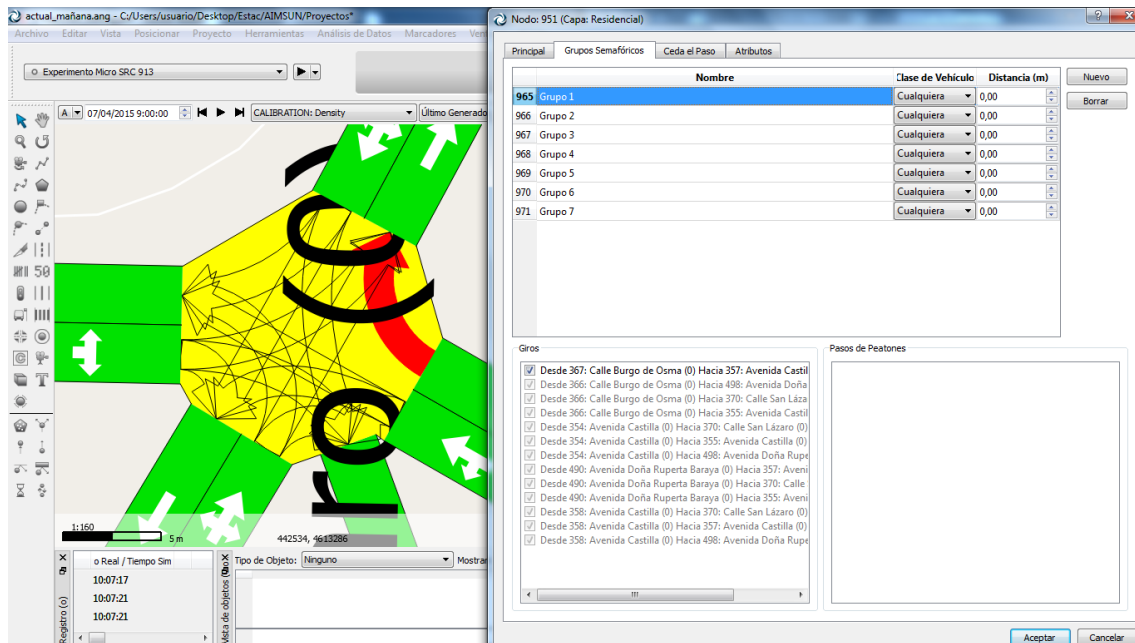


Figura 7.2: Grupos semafóricos generados

Una vez generados los grupos semafóricos lo que se crea son las fases semafóricas a partir de un plan de control. En lo que consiste es en la distribución de tiempos para cada uno de los grupos que se han generado con anterioridad. El tiempo de ciclo total que se ha asignado al ciclo semafórico son 110 segundos, asignando un tiempo en ámbar de 3 segundos y 6 segundos de duración total de la interfase, es decir, 3 segundos en ámbar y otros 3 segundos en el que todos los semáforos están en rojo.

Cabe indicar que no se ha estipulado la regulación semafórica en la intersección para el paso de personas ya que simplemente consistiría en acoplarlas a la regulación realizada para los vehículos de tal forma que no exista conflicto entre vehículos y personas.

Las fases semafóricas establecidas se ven en la Figura 7.3.

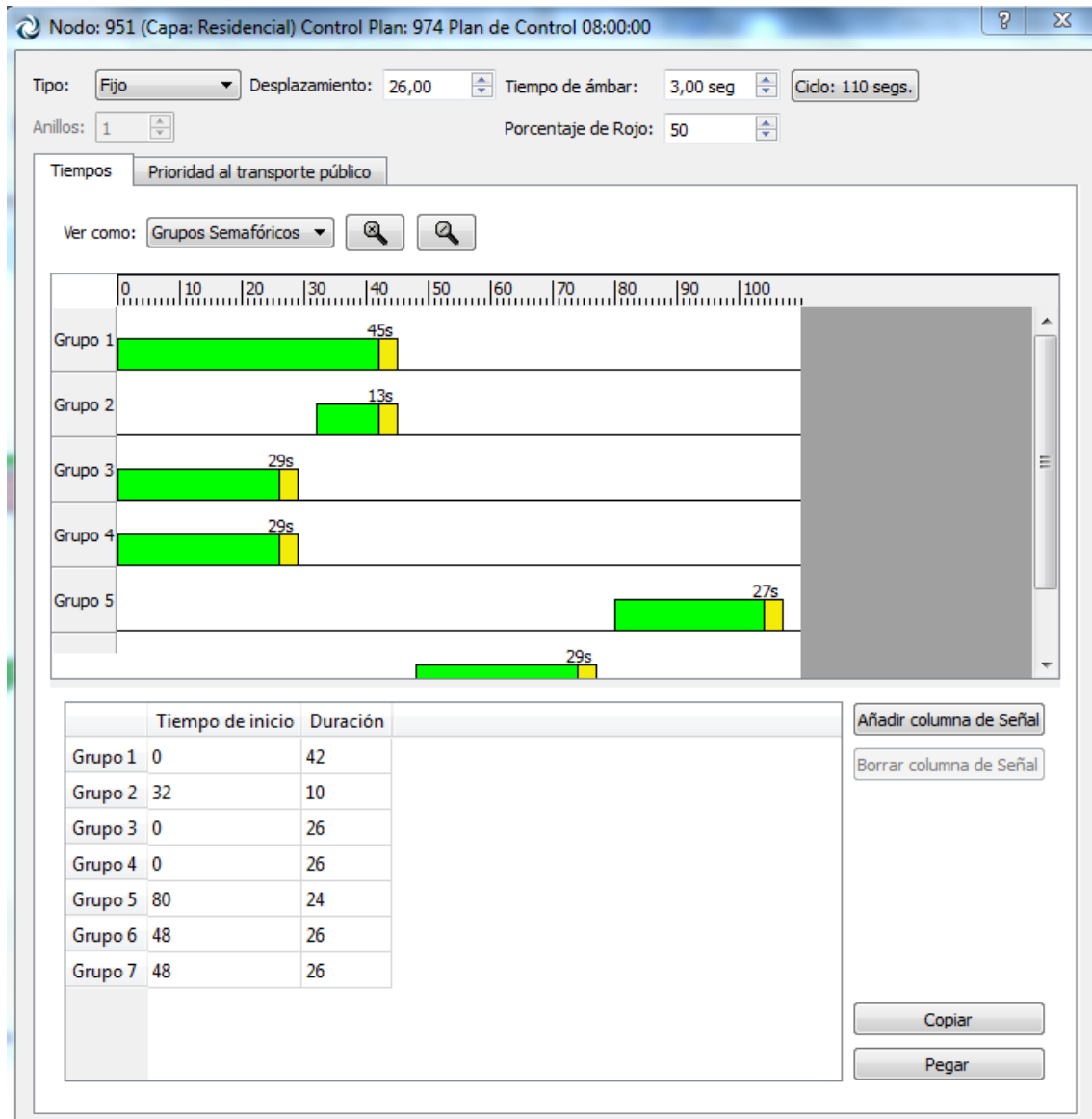


Figura 7.3: Fases semafóricas asignadas

### 7.1.1.3 Configuración de centroides

Los centroides son elementos de la red que actúan como generadores y receptores de vehículos, de tal forma que se ubican en todos los cortes de calles.

Se puede ver la pantalla ofrecida por Aimsun para su configuración en la Figura 7.4.

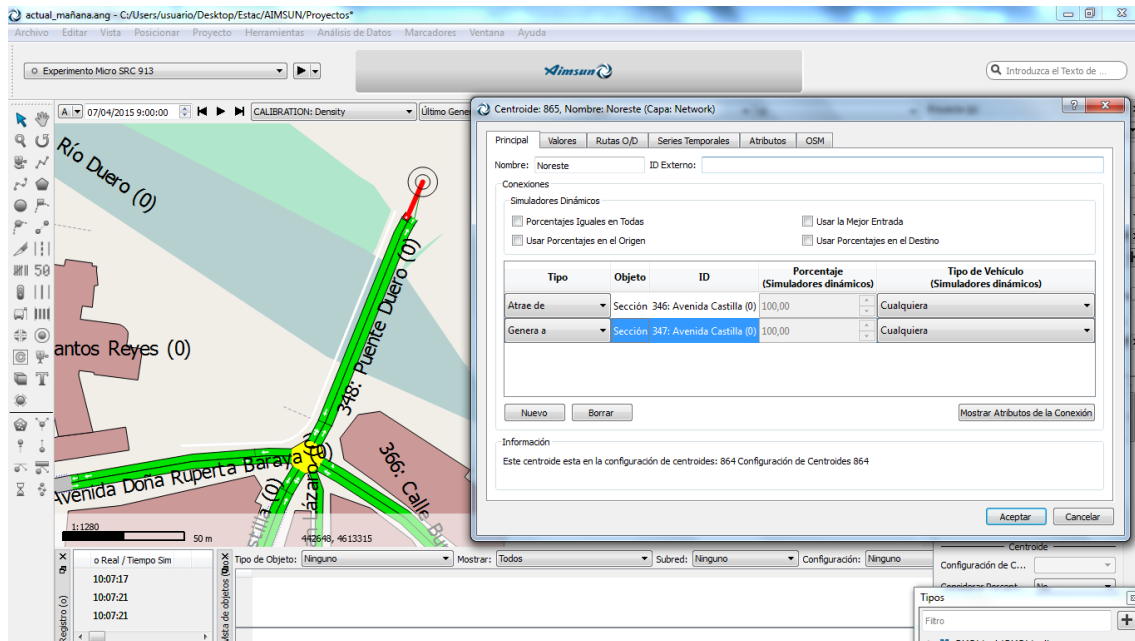


Figura 7.4: Detalle creación Centroide

#### 7.1.1.4 Creación de estado y demanda de tráfico

Existen principalmente dos maneras de generar la demanda de tráfico:

- A partir de un estado de tráfico.
- A partir de una matriz Origen destino.

En este caso se escoge la primera por una razón fundamental. Esta razón es la mayor facilidad aportada por este método para generar esta demanda a partir de los datos obtenidos por medio de las fichas mostradas en la Tabla 7.1. Ya que la recopilación de la información ha sido tomada por intersecciones de manera particular, y no de manera general a partir de nodos haciendo un estudio que indicara de donde proviene un vehículo y a donde va en la red global que se está estudiando. Por lo que generar la matriz origen destino es, a partir de dicha recopilación de datos, inviable.

Para establecer el estado del tráfico únicamente hay que completar dos pestañas con los datos correspondientes, la primera de ellas con los datos de vehículos/hora que pasan por cada una de las vías, y otra con los porcentajes de giro en las diferentes intersecciones. Se muestran estas ventanas de creación del estado del tráfico en las Figuras 7.5 y 7.6 respectivamente.

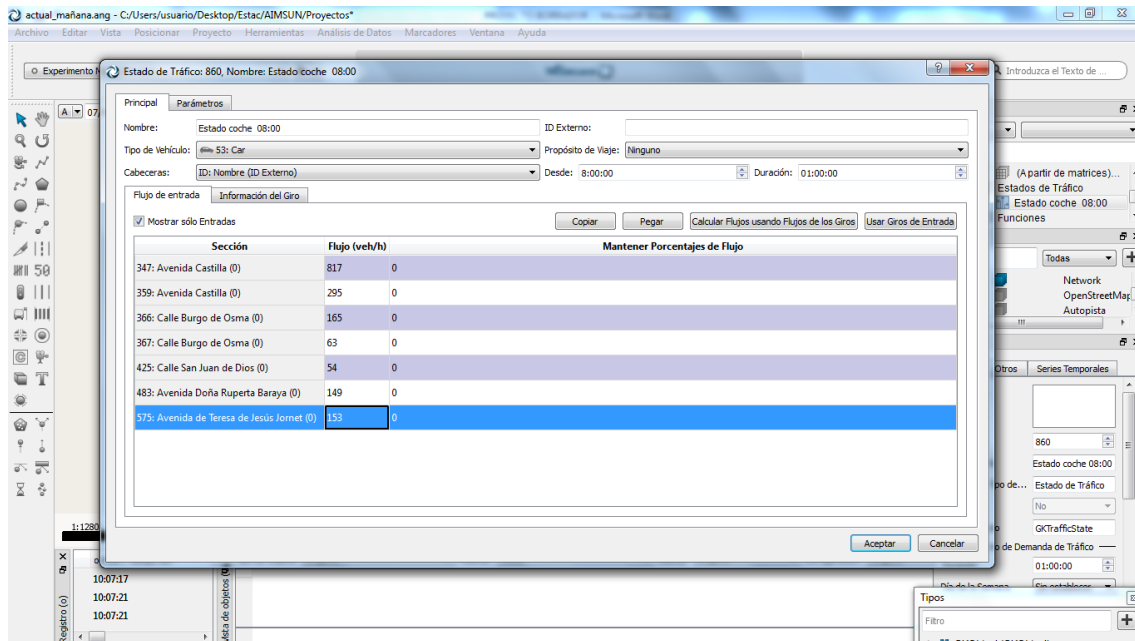


Figura 7.5: Vehículos/hora contabilizados en cada vía

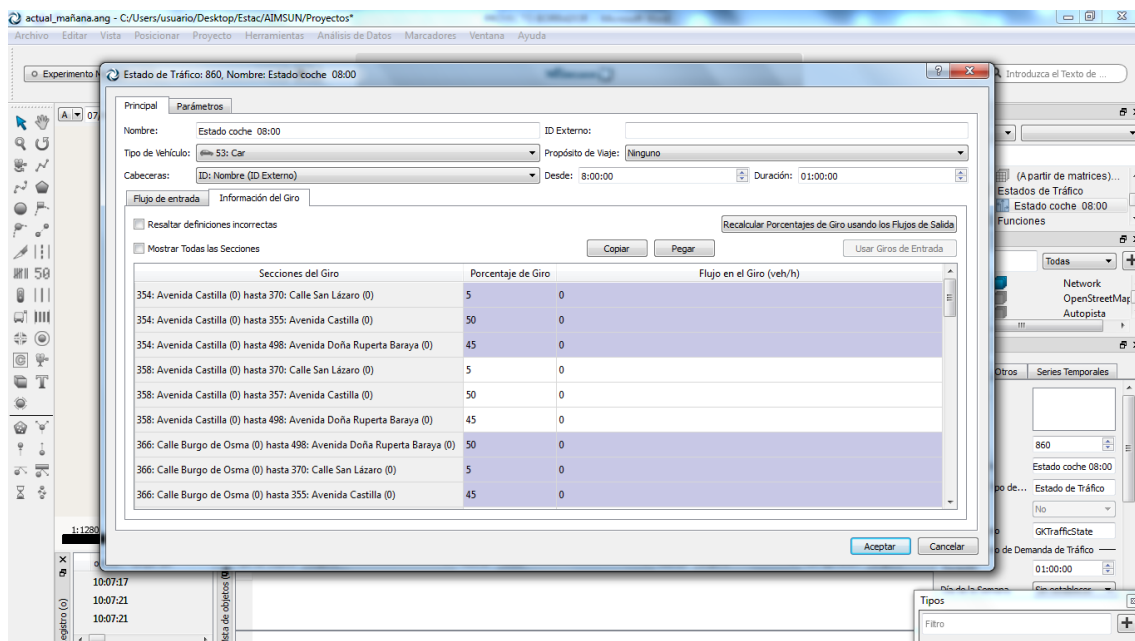


Figura 7.6: Giros en las intersecciones

El estado definido únicamente hace referencia a vehículos ligeros como se especifica en las Figuras 7.5 y 7.6, para tener en cuenta el estado asociado a vehículos pesados se tendría que definir otro estado, pero como por los datos obtenidos se ha comprobado que simbolizan menos del 2% del total, se desprecia este efecto.

#### 7.1.1.5 Simulación

A la hora de realizar una simulación hay que tener en cuenta diferentes factores. En primer lugar el estudio que se pretende realizar, para ello con la

aplicación se pueden llevar a cabo los siguientes:

- a) *Análisis Macroscópico*. Estudia el comportamiento de los vehículos y de sus conductores a gran escala, dependiendo de sus condiciones del tráfico existente. Este análisis es el más grande que se puede realizar en un estudio de tráfico vehicular.
- b) *Análisis Mesoscópico*. Para realizar este análisis se pueden crear grupos de vehículos o estudiarlos de manera individual, observando que sus características sean similares tales como tamaño del vehículo, velocidad, deseo de viajes, etc. Este segundo análisis se comporta de manera más sintetizada que la anterior, se le puede considerar de rango medio para su aplicación en un estudio de tráfico. En el modelo mesoscópico las restricciones de aceleración y desaceleración no se usan y eso permite pasar de un modelo basado en un paso de simulación a un modelo basado en eventos ya que sólo se calculan los tiempos de entrada y salida de la sección.
- c) *Análisis Microscópico*. Es el más discreto de los análisis empleados, trata individualmente a cada uno de los vehículos, describiendo el comportamiento del flujo de tráfico. Este análisis es la herramienta más avanzada en el campo de representación de la circulación vehicular que se puede aplicar. El modelo microscópico está basado en un paso de simulación en el cual se actualizan todos los vehículos de la red. Esta actualización incluye la posición y velocidad de los vehículos.

Por lo explicado en el párrafo anterior, se considera que el análisis más conveniente para la red que se desea estudiar es el análisis microscópico, ya que se quiere hacer un estudio lo más exhaustivo posible. Para realizar estos análisis el programa dispone de diferentes modelos de simulación, entre otros:

- a) Un modelo de seguimiento de vehículos.
- b) Un modelo de cambio de carril.
- c) Un modelo de aceptación de brecha para modelar los vehículos que están delante de una señal de ceda al paso o de stop.

Para realizar una simulación en primer lugar se debe crear un escenario dinámico sobre el cual se efectuara la simulación. Se puede ver en la Figura 7.7 la ventana que ofrece esta posibilidad.

Figura 7.7: Pestaña creación escenario dinámico

En esta pestaña únicamente se indica la fecha en la que se realiza la simulación, a partir de donde obtiene el escenario la demanda de tráfico (en este caso del estado generado en el apartado 7.1.1.4, y no de una matriz O/D), y más abajo se indica el plan de control maestro que regula las intersecciones semaforicas existentes.

Una vez creado el escenario, se debe generar el experimento a llevar a cabo, en el experimento se indica el tipo de simulación a realizar (microscópica) y el modelo de toma de decisiones que es un modelo estocástico.

Cuando ya se tiene el experimento definido, su puede realizar una replicación que actúa como contenedor para la simulación. Con ello la simulación ya se puede llevar a cabo.

Ni que decir tiene que existen infinidad de parámetros sobre los que actuar dentro de cada una de las simulaciones que se realicen, en este caso se ha decidido dejar todos los valores como predefinidos, ya que al importar la red desde internet, todos los parámetros aparecen ya relacionados a la misma, y se corresponden de una manera adecuada con las simulaciones que se van a realizar. La Figura 7.8 muestra una imagen de una simulación.

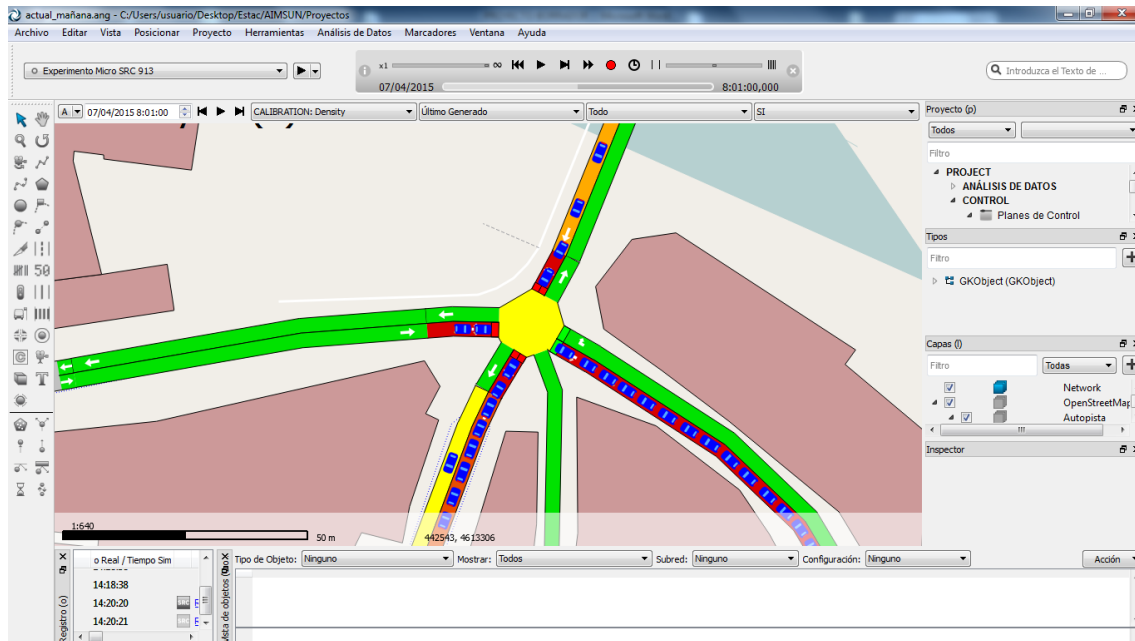


Figura 7.8: Imagen de simulación

### 7.1.2 Simulación hora punta matinal. Análisis del tráfico.

La zona colindante a la terminal Arandina suele ser zona de conflicto en los horarios punta matinal y vespertino y se suelen producir colas de vehículos importantes, ya que se encuentra entre varias de las carreteras más transitadas que unen el centro urbano con el principal polígono industrial de la localidad, en el que se encuentra, por ejemplo, una de las factorías de Michelin.

La técnica de análisis será la de, a partir de la información obtenida in situ, obtener el funcionamiento de la red gracias a los resultados de la simulación, y así conocer los puntos de procedencia y destino del tráfico que está usando el viario próximo a la estación de cara a cualquier necesidad de actuación.

Tras analizar levemente el tráfico en la zona, se observa que el principal creador de estas colas es un cruce semafórico entre las calles Puente Duero, Calle Burgo de Osma, Calle San Lázaro, Avenida Castilla y Avenida Doña Ruperta Baraya. Esta última es además la que da acceso a la nueva terminal. Por ello será uno de los puntos sobre los que trabajar cuando llegue el momento.

La hora punta matinal se corresponde para este estudio con la franja horaria de entre las 8:00 y las 9:00 de la mañana. Para realizar el análisis se usan como base los datos recopilados en ese horario un día laboral cualquiera, multiplicándolos por el factor correspondiente que se estudió en el Capítulo 3 sobre la demanda generada y demanda inducida, que suman un máximo de 3,5% a mayores para el primer año.



### 7.1.2.1 Plano de flujo

Se muestra en la Figura 7.9 el plano de flujos de vehículos (veh/hora) desprendido de la simulación mencionada anteriormente. En él se observa con cambios de color de rojo a verde y diferentes tonalidades intermedias de estos colores los flujos en las diferentes vías, y también aparece el número de veh/hora en esa misma vía.

Al tratarse de la hora punta de salida del núcleo urbano se observa claramente que las vías con mayor flujo de vehículos son precisamente esas, es decir, las utilizadas por los usuarios para dirigirse a sus respectivos puestos de trabajo.

De igual manera se observa que el cruce semafórico marcado en amarillo está generando un gran conflicto entre los diferentes vehículos que se desplazan por las vías, ya que la gran mayoría de vehículos se encuentran en esa zona del plano.

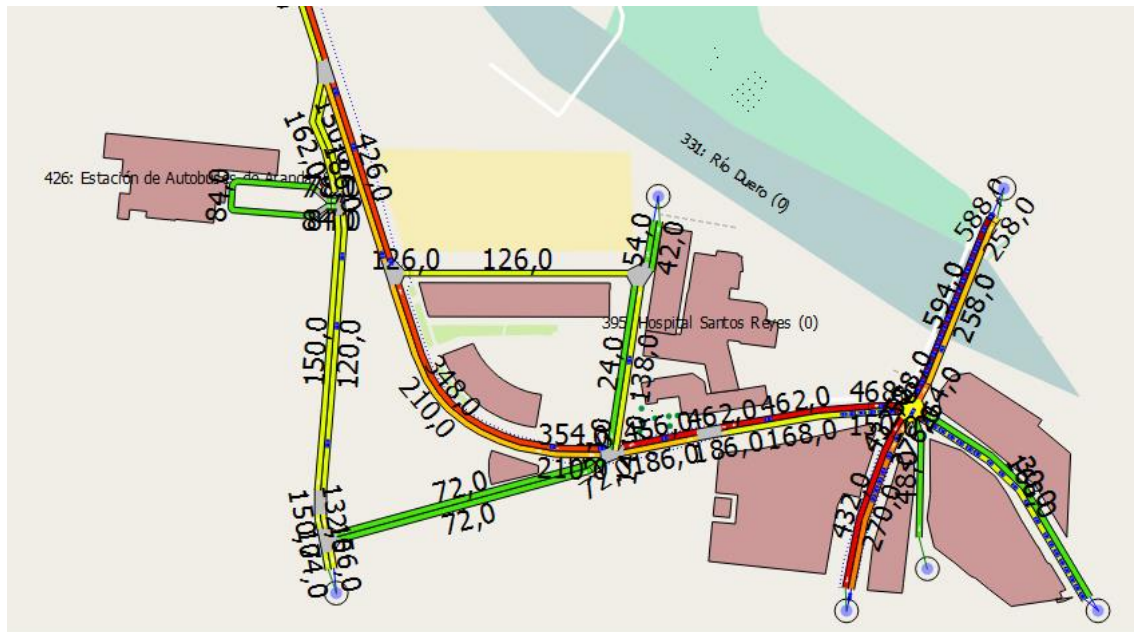
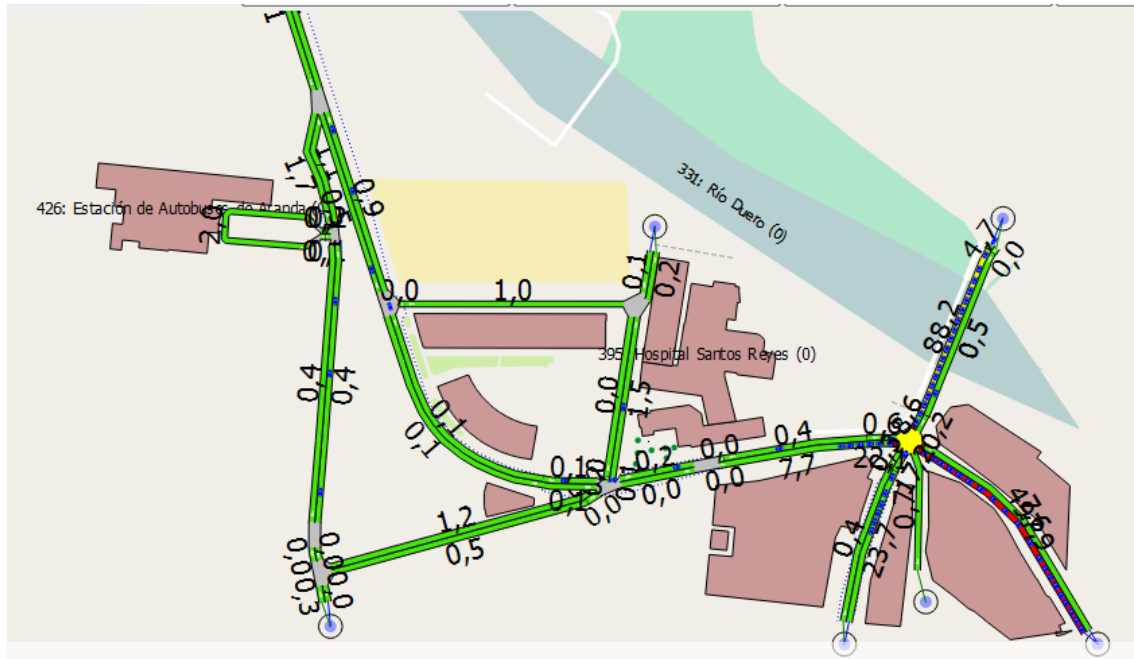


Figura 7.9: Plano de flujo situación actual matinal

### 7.1.2.2 Plano de tiempo de demora

Al igual que en el apartado anterior, en este se presenta uno de los planos proporcionados por Aimsun. Se observa en la Figura 7.10 el plano de tiempo de demora obtenido de la aplicación. En los planos también se marcan las cifras asociadas a los valores de estudio en cada una de las vías estudiadas, aunque en algunos casos estos números se superponen y no se pueden apreciar con claridad.





**Figura 7.10: Plano de tiempo de demora situación actual matinal**

Se aprecia de forma evidente en este plano de demora que las mayores esperas se producen en las entradas del cruce semafórico marcado en el plano en amarillo, sobre todo en las calles que unen el mismo con la zona céntrica de la ciudad y en el sentido de salida de este núcleo urbano, es decir, en los carriles marcados en rojo, por colores los colores verdes simbolizan tiempos de demora pequeños y el rojo tiempos de demora grandes. Con lo cual se trata de un plano correlativo con la situación en estudio.

### 7.1.2.3 Plano de velocidad

De igual modo que en los dos apartados anteriores, en este se puede observar en la Figura 7.11 uno de los planos devueltos por Aimsun tras realizar la simulación. En este caso se trata de un plano relacionado con la velocidad de circulación de los vehículos por las diferentes vías.



Tabla 7.2: Tabla resumen situación actual matinal

Serie Temporal	Valor	Unidades
Cola Media - Car	40,57	veh
Cola Virtual Máxima - Car	59	veh
Cola Virtual Media - Car	29,54	veh
Contaje de Entrada - Car	1378	veh
Densidad - Car	16,69	veh/km
Distancia Total de Viaje - Car	629,72	km
Flujo- Car	1378	veh/h
Giros Perdidos - Car	0	
Número de Paradas - Car	1,22	#/veh/km
Tiempo de Demora - Car	363,11	seg/km
Tiempo de Viaje - Car	430,57	seg/km
Tiempo Total de Viaje - Car	56,21	h
Vehículos Dentro - Car	69	veh
Vehículos Esperando Entrar - Car	37	veh
Vehículos Perdidos Dentro - Car	0	veh
Vehículos Perdidos Fuera - Car	0	veh
Velocidad - Car	20,95	km/h
Velocidad Armónica - Car	8,36	km/h

#### 7.1.2.5 Gráficas relevantes asociadas

Se exponen a continuación una serie de figuras que contienen gráficos de la evolución temporal durante la hora de estudio de las principales variables medidas por la aplicación. Son:

- Gráfico de cola media actual matinal (Figura 7.12).
- Gráfico de densidad actual matinal (Figura 7.13).
- Gráfico de flujo actual matinal (Figura 7.14).
- Gráfico de número de paradas actual matinal (Figura 7.15).
- Gráfico de tiempo de demora actual matinal (Figura 7.16).
- Gráfico de tiempo de viaje actual matinal (Figura 7.17).
- Gráfico de velocidad actual matinal (Figura 7.18).

Aunque su lectura es directa, se hace un breve análisis de los mismos al finalizar este apartado comentando las situaciones más relevantes observadas en los propios gráficos.

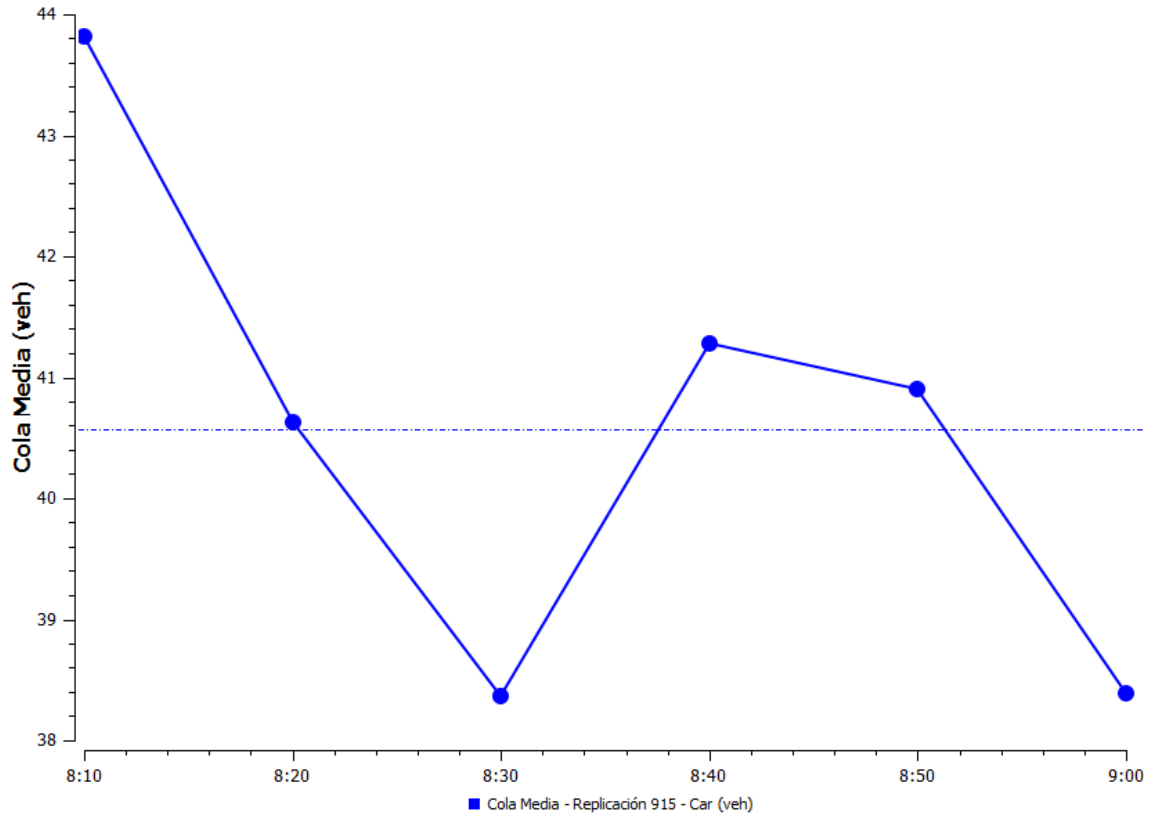


Figura 7.12 Gráfico cola media actual matinal

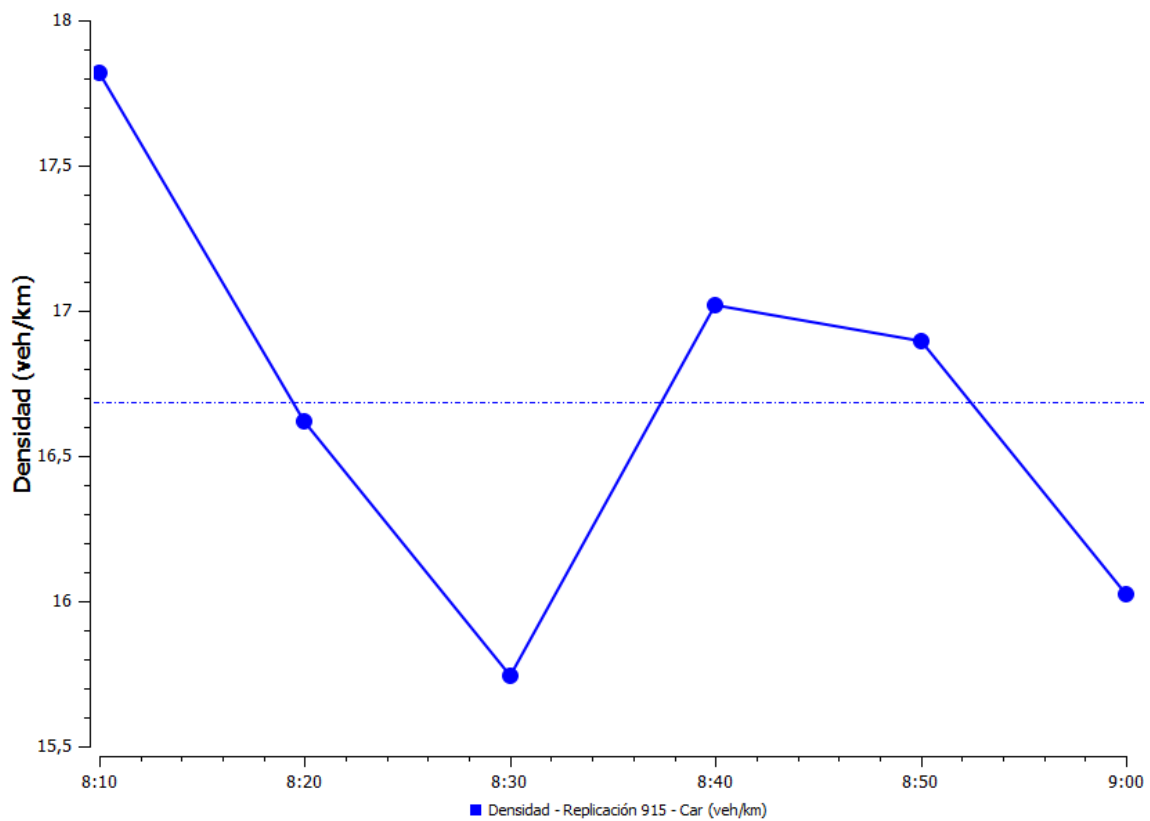


Figura 7.13: Gráfico densidad actual matinal

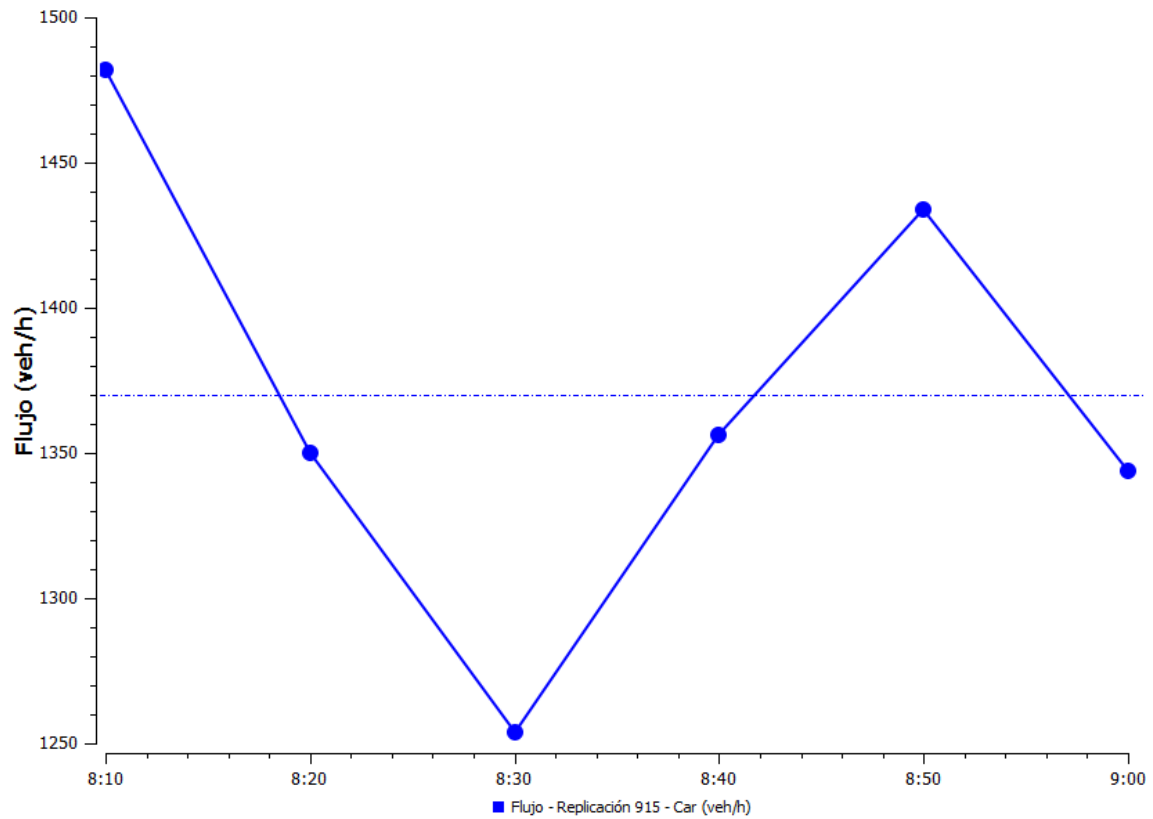


Figura 7.14 Gráfico flujo actual matinal

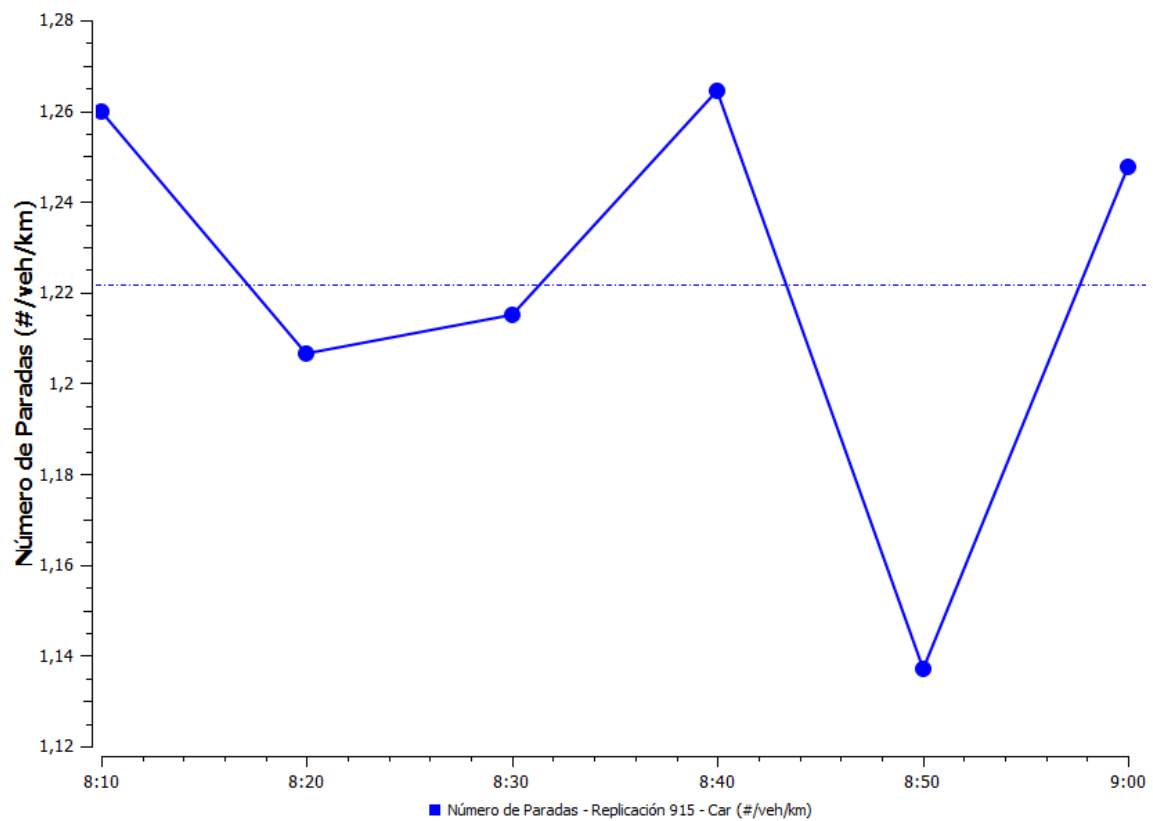


Figura 7.15 Gráfico número de paradas actual matinal

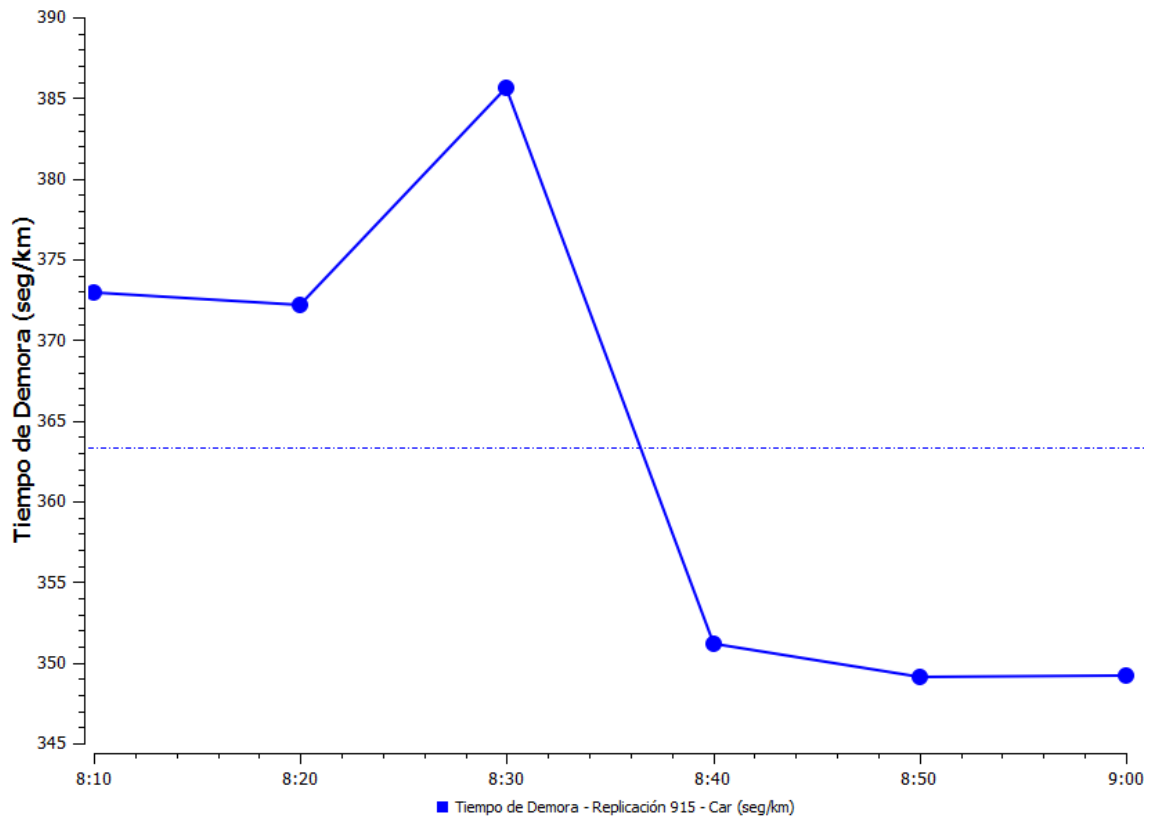


Figura 7.16: Gráfico tiempo de demora actual matinal

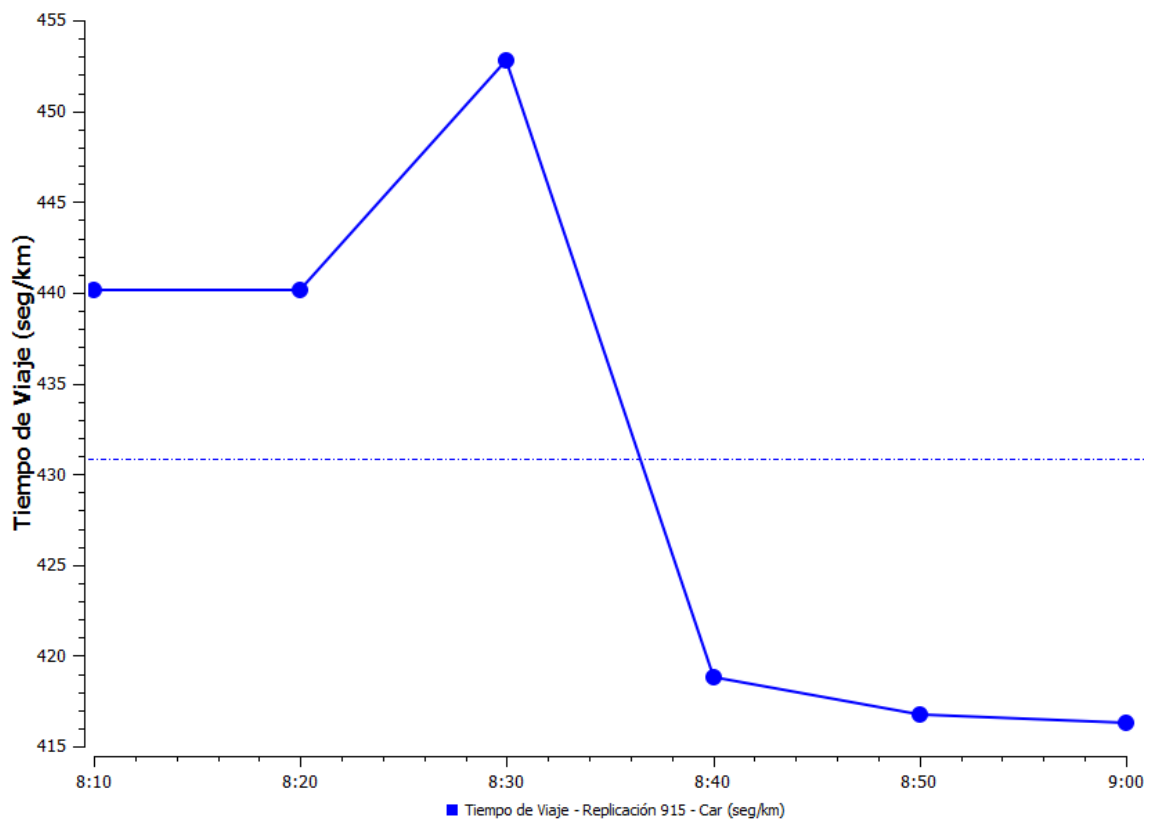


Figura 7.17: Gráfico tiempo de viaje actual matinal

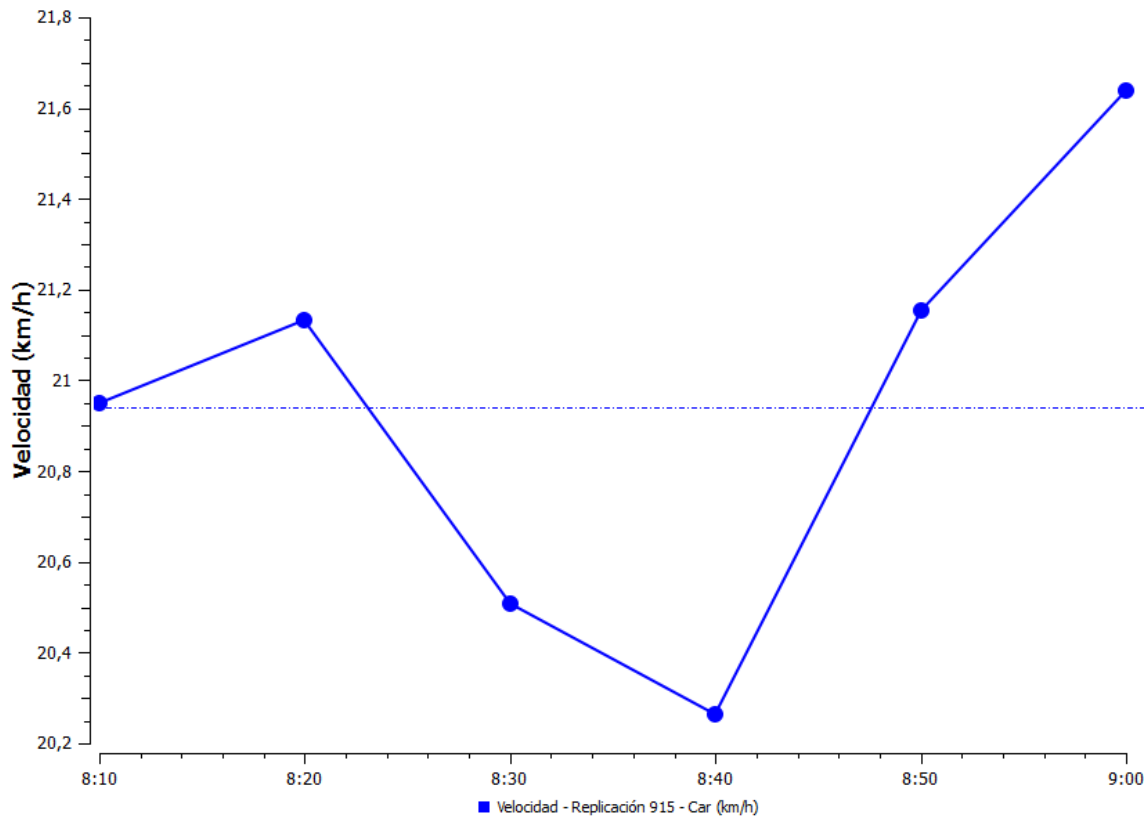


Figura 7.18: Gráfico velocidad actual matinal

Haciendo un análisis sintético de los gráficos en general se observa que en los primeros instantes transcurridos la circulación es más complicada, tal y como indican valores de cola, densidad, flujo, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos alto y también los valores bajos de velocidad. Sin embargo se ve que las gráficas van evolucionando hacia valores indicativos de una mejor circulación hacia el final de la hora de estudios, obteniéndose el valor de velocidad más alto del periodo de tiempo y los valores de cola, densidad, flujo, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos más bajos. La importancia de estas graficas radica, además de en poder visualizar la evolución del tráfico a lo largo de la hora de estudio, en fijarse en los rangos en los que se mueven los valores de cada una de las gráficas para después compararlos con los de las gráficas de la situación corregida, y ver si los valores mejoran con respecto a estos o no.

### 7.1.3 Simulación hora punta vespertina. Análisis del tráfico.

La hora punta vespertina es la comprendida entre las 18:00 y las 19:00 de la tarde, correspondiente con el regreso de las personas del trabajo a sus casas. Para realizar el análisis se toman como base los datos recopilados en ese horario un día laboral cualquiera, multiplicándolos por el factor correspondiente obtenido en el Capítulo 3 de demanda generada y demanda inducida, que suman un máximo de 3,5% a mayores para el primer año.

### 7.1.3.1 Plano de flujo

La Figura 7.19 muestra el plano de flujo asociado a la situación vespertina de estudio. Muestra en veh/hora la cantidad de estos que atraviesan una sección de las diferentes vías.

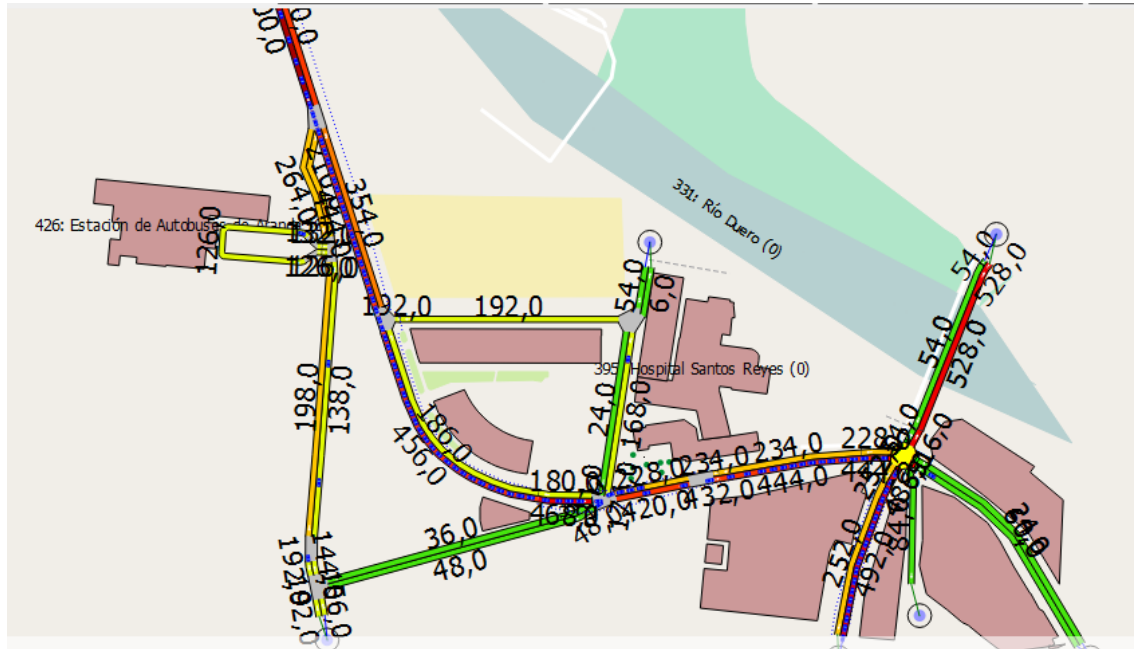


Figura 7.19: Plano de flujo situación actual vespertina

En este caso al contrario que en la situación anterior se está analizando la hora de regreso de la gente de sus trabajos al núcleo urbano, por lo que las vías más colapsadas son aquellas por las que regresan, se observa que éstas están marcadas en el plano mostrado en la Figura 7.19 de un color rojo, aunque quedan casi tapadas por el color azul de los coches debido a la alta densidad de estos en esas vías. Ese color rojo indica el alto flujo de vehículos asociado a esas carreteras.

Al igual que en los planos mostrados para la situación de estudio matinal, en estos planos también aparecen como referencia los números que ponderan los valores de la variable mostrada, en este caso el flujo, en las diferentes vías que conforman la red que se está estudiando. De esta forma es fácil hacerse una idea de en qué rangos de valores se moverán las gráficas que se muestran más adelante en el apartado 7.1.3.5

### 7.1.3.2 Plano de tiempo de demora

La Figura 7.20 muestra el plano de tiempo de demora asociado a la situación vespertina que se está estudiando.



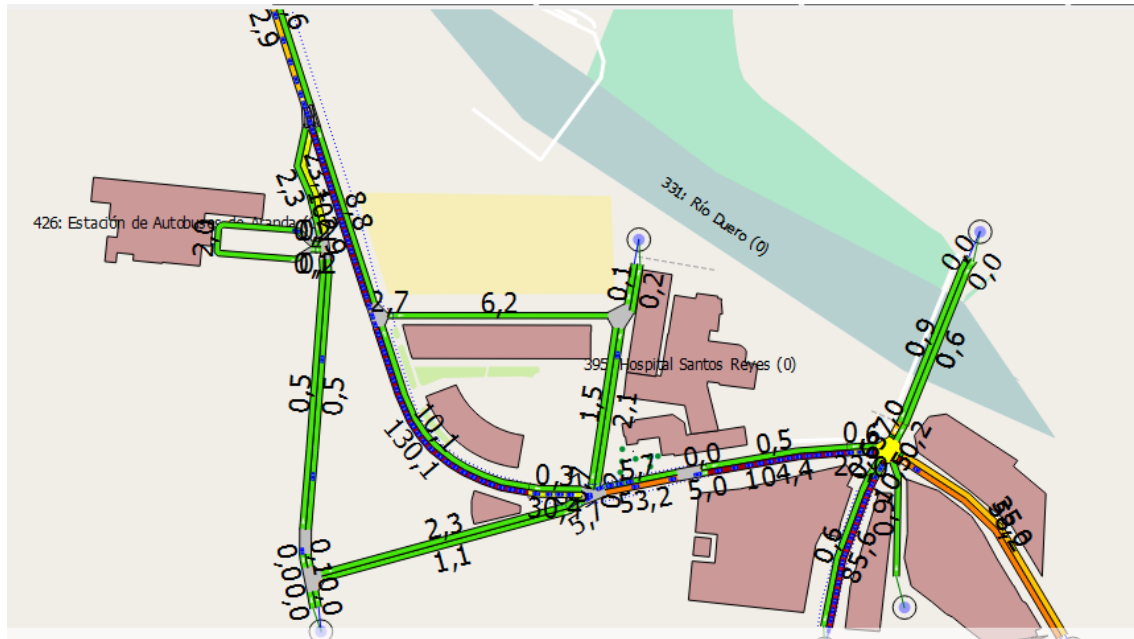


Figura 7.20: Plano de tiempo de demora situación actual vespertina

Se observa que a pesar de que los tiempos de demora mayores se siguen produciendo en las zonas próximas al cruce semafórico, en este caso los máximos se dan en los carriles de acceso al centro urbano. Al igual que en el resto de planos vistos hasta ahora, los colores verdes se asocian con tiempos de demora pequeños y los rojos con tiempos de demora grandes.

### 7.1.3.3 Plano de velocidad

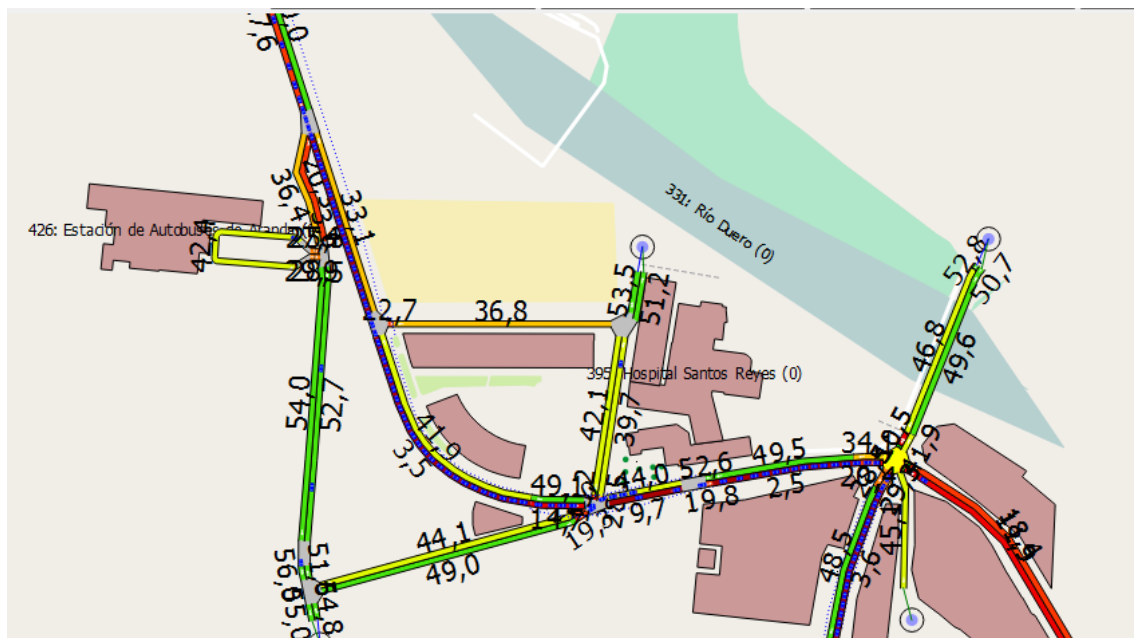


Figura 7.21: Plano de velocidad situación actual vespertina

El plano asociado a la velocidad de los vehículos en la situación vespertina de estudio mostrado en la Figura 7.21 debe leerse teniendo en

cuenta que los colores rojos o anaranjados simbolizan velocidades bajas, mientras que en zonas de buena circulación las velocidades son más altas y están marcadas en verdes o amarillos.

#### 7.1.3.4 Tabla resumen de los resultados obtenidos

En la Tabla 7.3 se muestran los valores medios de las principales variables medidas por Aimsun durante esta simulación.

Al igual que ocurría con la tabla mostrada en el apartado 7.1.2.4, los valores ofrecidos en la Tabla 7.3 deben tenerse en cuenta ya que serán datos útiles a la hora de comparar resultados entre simulaciones.

**Tabla 7.3: Tabla resumen situación actual vespertina**

<b>Serie Temporal</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Cola Media - Car</b>	58,97	veh
<b>Cola Virtual Máxima - Car</b>	17	veh
<b>Cola Virtual Media - Car</b>	2,39	veh
<b>Contaje de Entrada - Car</b>	1442	veh
<b>Densidad - Car</b>	25,69	veh/km
<b>Distancia Total de Viaje - Car</b>	678,55	km
<b>Flujo - Car</b>	1395	veh/h
<b>Giros Perdidos - Car</b>	0	
<b>Número de Paradas - Car</b>	1,45	#/veh/km
<b>Tiempo de Demora - Car</b>	338,94	seg/km
<b>Tiempo de Viaje - Car</b>	406,18	seg/km
<b>Tiempo Total de Viaje - Car</b>	81	h
<b>Vehículos Dentro - Car</b>	107	veh
<b>Vehículos Esperando para Entrar - Car</b>	10	veh
<b>Vehículos Perdidos Dentro - Car</b>	0	veh
<b>Vehículos Perdidos Fuera - Car</b>	0	veh
<b>Velocidad - Car</b>	16,36	km/h
<b>Velocidad Armónica - Car</b>	8,86	km/h

#### 7.1.3.5 Gráficas relevantes asociadas

Se exponen a continuación una serie de figuras que contienen gráficos de la evolución temporal durante la hora de estudio de las principales variables medidas por la aplicación. Son:

- Gráfico de cola media actual vespertina (Figura 7.22).
- Gráfico de densidad actual vespertina (Figura 7.23).
- Gráfico de flujo actual vespertina (Figura 7.24).
- Gráfico de número de paradas actual vespertina (Figura 7.25).
- Gráfico de tiempo de demora actual vespertina (Figura 7.26).
- Gráfico de tiempo de viaje actual vespertina (Figura 7.27).

- Gráfico de velocidad actual vespertina (Figura 7.28).

Aunque su lectura es directa, se hace un breve análisis de los mismos al finalizar este apartado comentando las situaciones más relevantes observadas en los propios gráficos.

Cabe mencionar, que al hacer una lectura de estos gráficos se puede obtener una idea de cómo va evolucionando la hora de estudio a medida que transcurren los minutos. Estas variaciones, al tratarse de un sistema estocástico, dependerán de todo aquello que ha ocurrido hasta el instante evaluado y de lo que designe que va a ocurrir en las decisiones siguientes un sistema arbitrario manejado por la propia aplicación. Por lo que dos simulaciones del mismo estudio no tienen por qué dar como resultados las mismas gráficas, aunque si deben parecerse ya que las variables y factores de partida son los mismos en ambas.

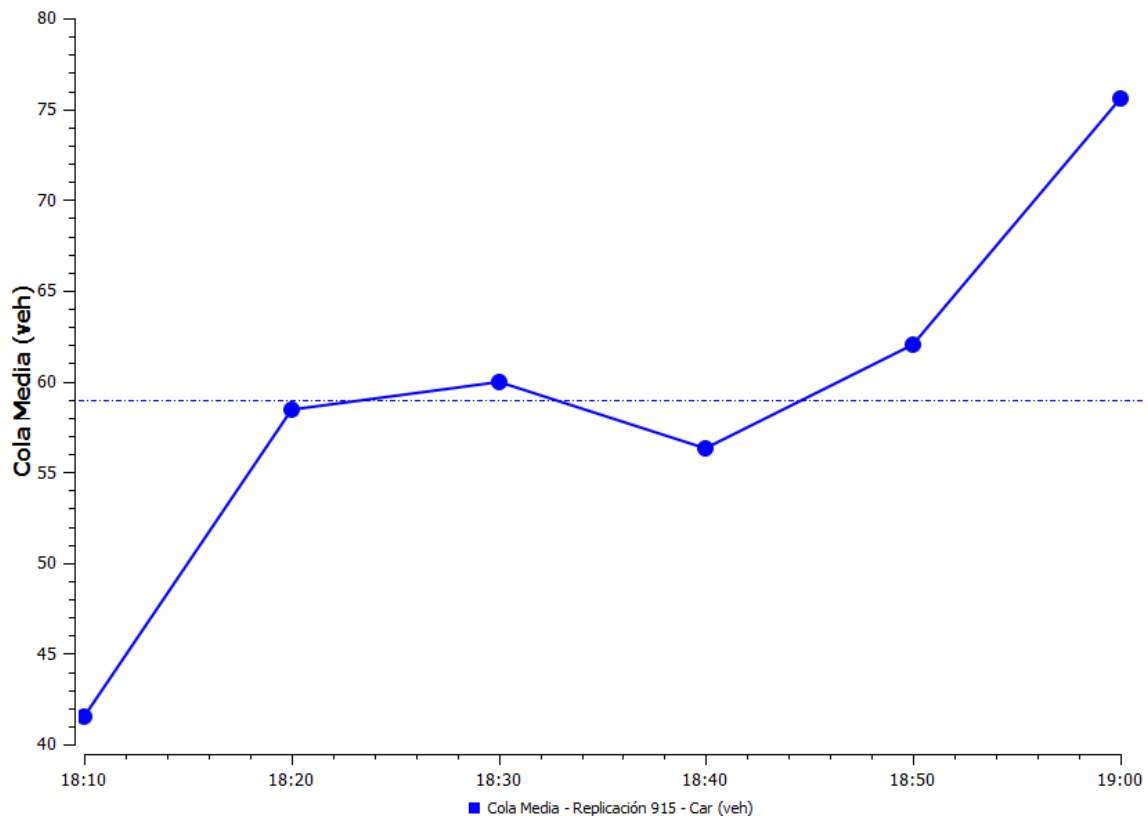


Figura 7.22: Gráfico cola media actual vespertina

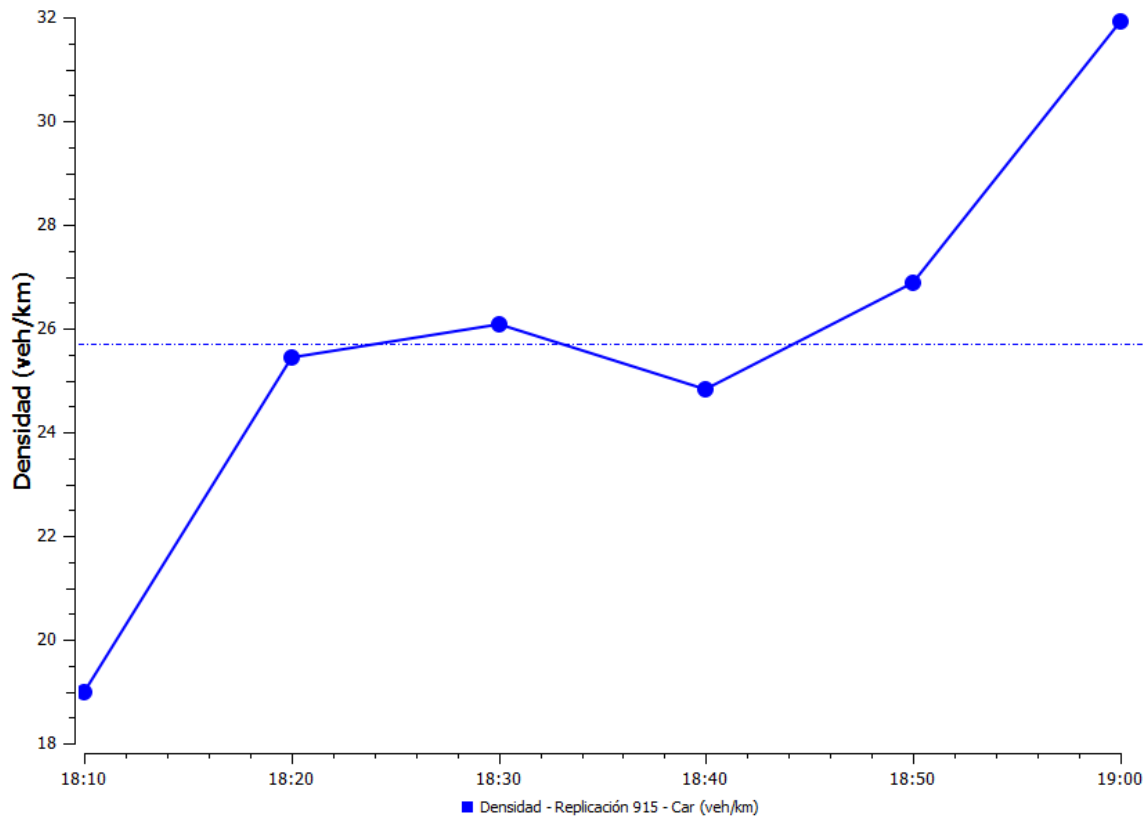


Figura 7.23: Gráfico densidad actual vespertina

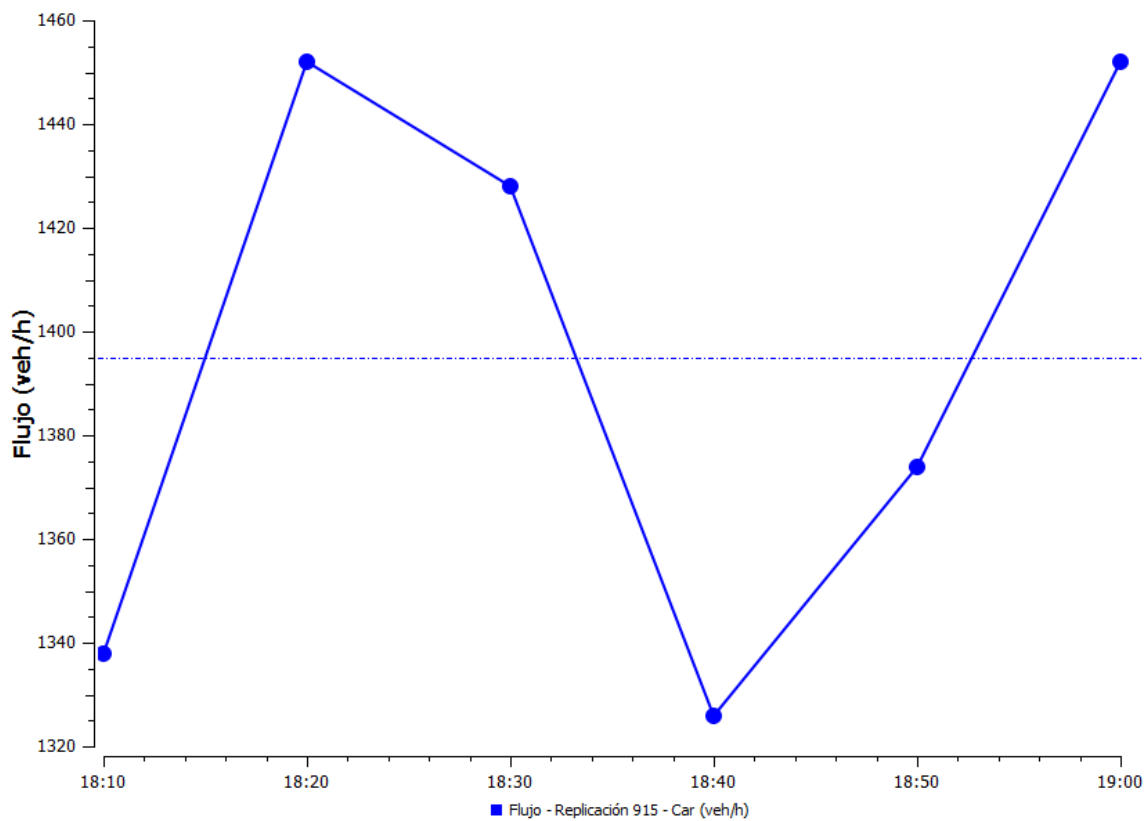


Figura 7.24: Gráfico flujo actual vespertina

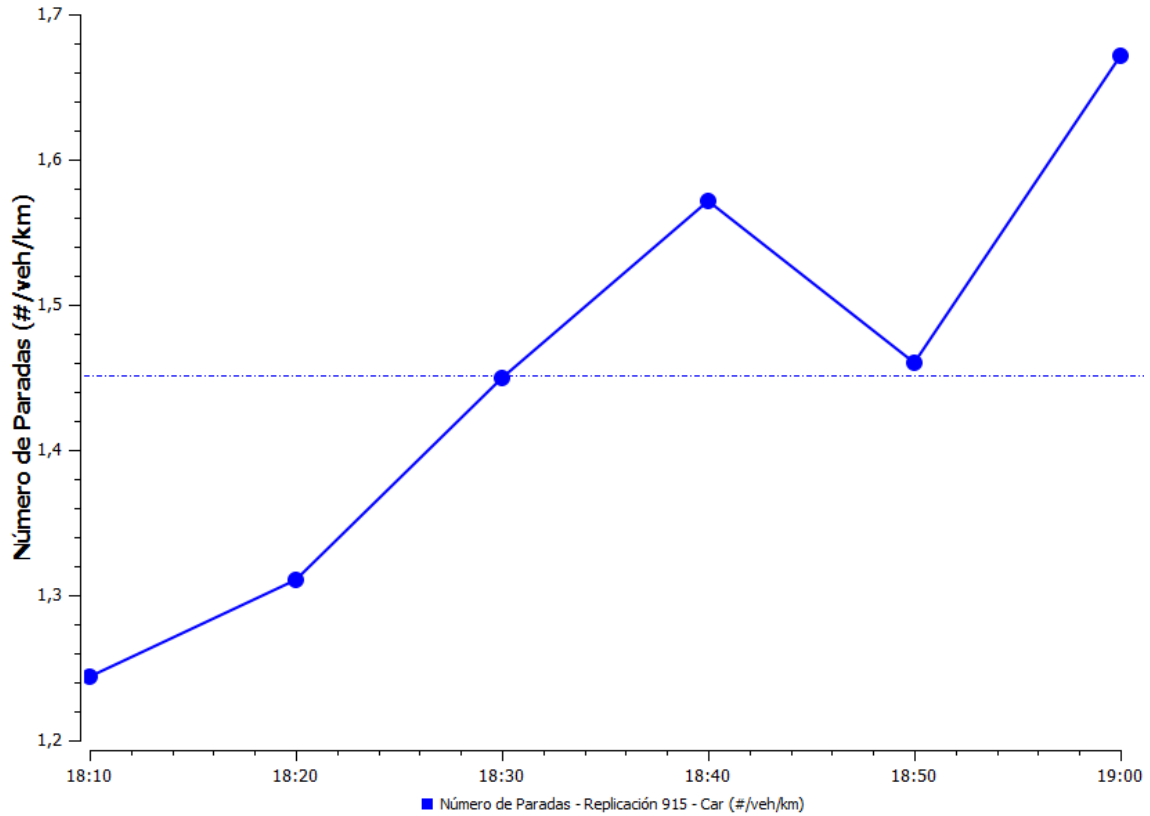


Figura 7.25: Gráfico número de paradas actual vespertina

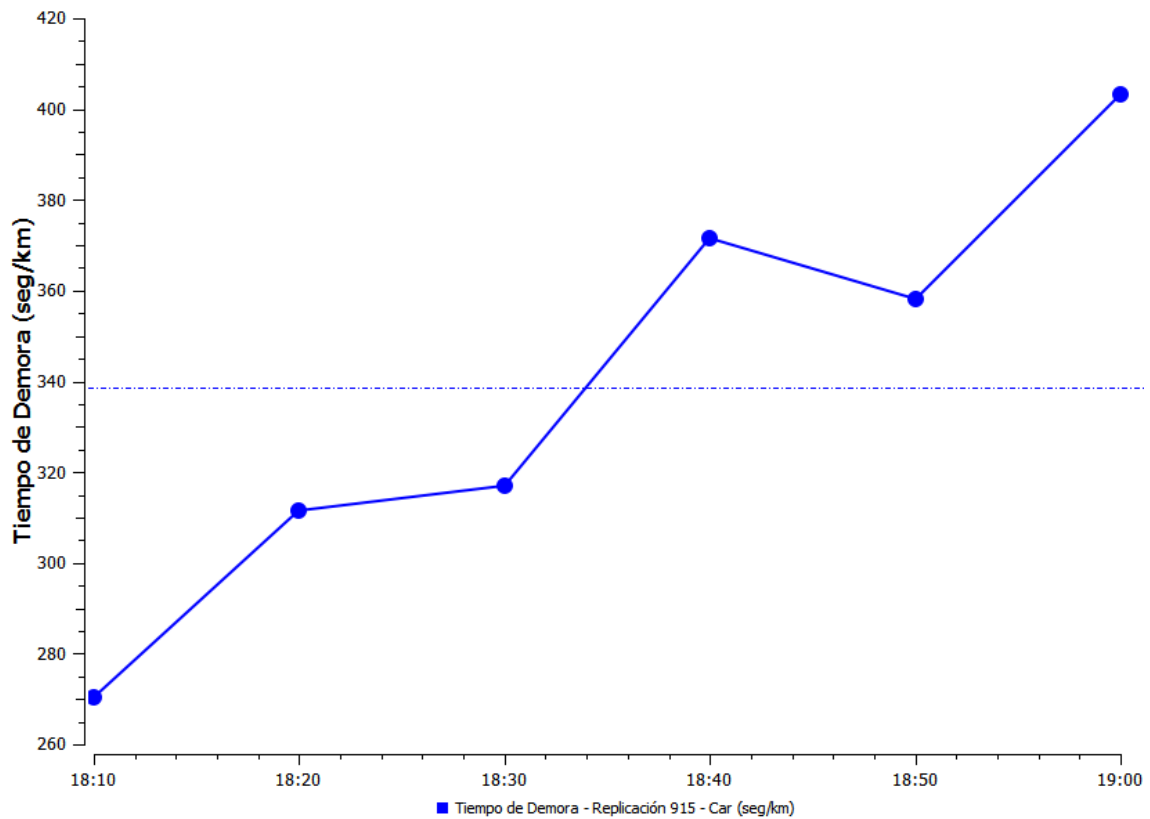


Figura 7.26: Gráfico tiempo de demora actual vespertina

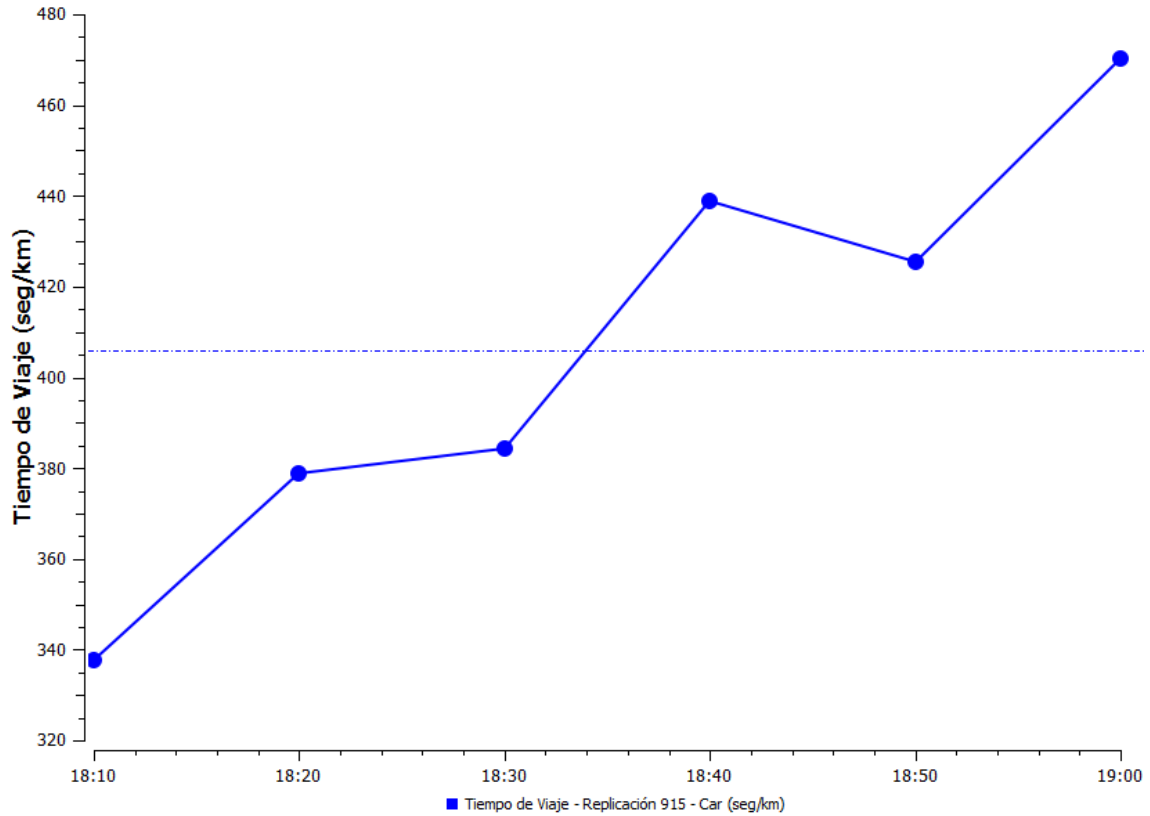


Figura 7.27: Gráfico tiempo de viaje actual vespertina

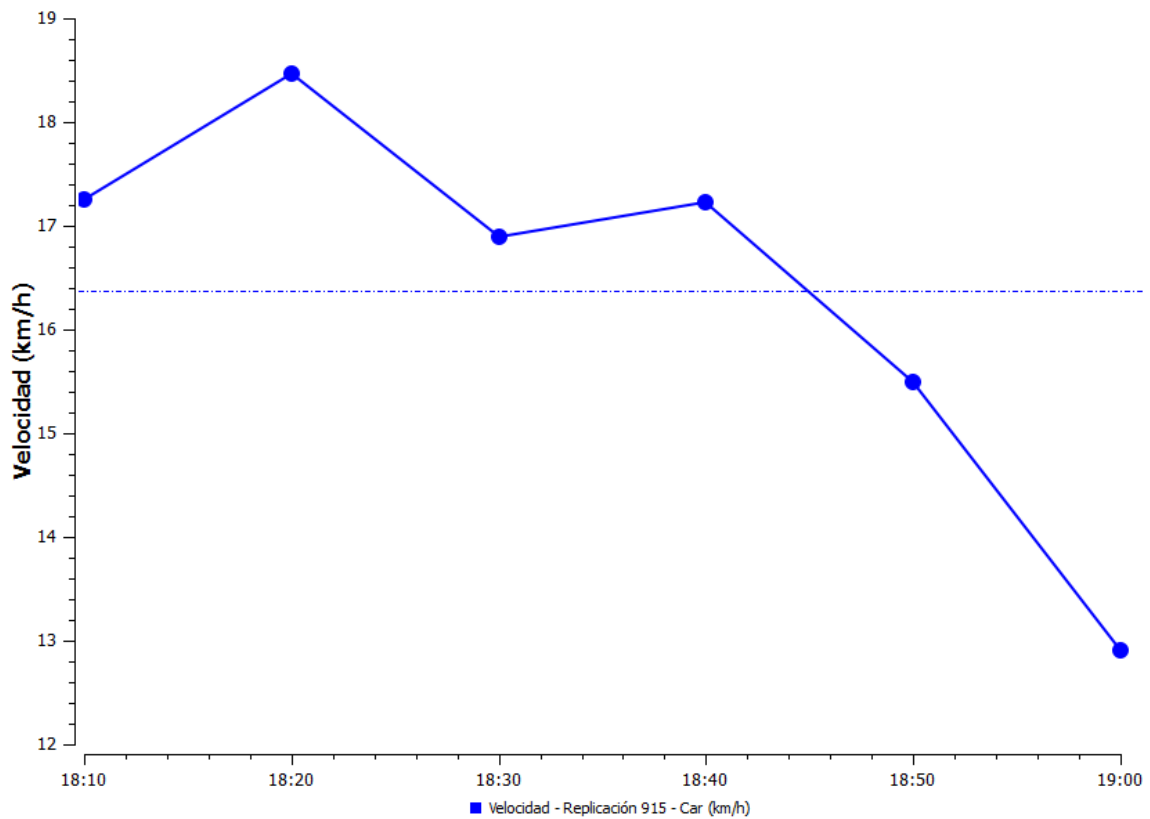


Figura 7.28: Gráfico velocidad actual vespertina

En este caso se ve que en los primeros instantes transcurridos la circulación es mejor que en el final de la hora de estudio tal y como indican valores de cola, densidad, flujo, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos bajos y también los valores altos de velocidad. Sin embargo, se ve que las gráficas van evolucionando hacia valores indicativos de una peor circulación hacia el final de la hora de estudio, obteniéndose el valor de velocidad más bajo del periodo de tiempo y los valores de cola, densidad, flujo, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos más altos. Es importante tener en cuenta los rangos en los que se mueven los valores de cada una de las gráficas para después compararlos con los de las gráficas de la situación corregida que se muestra en los apartados 7.1.5 y 7.1.6, y ver si los valores mejoran con respecto a estos o no.

#### 7.1.4 Medidas correctoras

Una vez conocidos los valores de las condiciones del tráfico actual en sus horas punta, se intentan introducir medidas correctoras adecuadas para mejorar todos los parámetros obtenidos anteriormente.

Existen diferentes puntos de conflicto en la red. Se debe prestar atención en mejorar el acceso a la terminal por parte tanto de los autobuses como de los vehículos de los usuarios, y también se debe mejorar la circulación de vehículos en el cruce semafórico entre las vías Puente Duero, Calle Burgo de Osma, Calle San Lázaro, Avenida Castilla y Avenida Doña Ruperta Baraya, eliminando este cruce semafórico e introduciendo una rotonda.

##### 7.1.4.1 Accesos a la terminal

El actual acceso a la terminal genera un conflicto en la circulación. El acceso se realiza a través de la Avda. de Doña Ruperta Baraya con carácter bidireccional tanto para los autobuses como para el acceso al parking de los usuarios. El problema es que los autobuses de gran tamaño que van a acceder a la estación con un giro hacia su derecha deben invadir el sentido contrario para poder alcanzar un radio de giro suficiente que le permita el entrar. De igual forma el acceso desde el otro sentido de la vía, es decir, acceder con un giro hacia la izquierda implica ceder el paso a los vehículos que circulan en sentido contrario hasta poder invadir ese carril para acceder a la terminal, con el riesgo que ello conlleva.

Lo que se propone es introducir una rotonda en cada una de las puertas dedicadas a los autobuses, y un ramal secundario que une ambas rotondas y da acceso y salida al parking de los usuarios de la nueva terminal.

Se puede ver la comparativa de la situación actual con el nuevo diseño que incluye las dos rotondas diseñadas y la ubicación de la nueva terminal en la siguiente imagen. La Figura 7.29 muestra la situación actual y en la Figura



7.30 se observan ya las correcciones realizadas, tal y como se han explicado en el párrafo anterior.



Figura 7.29: Situación actual de la red próxima a la terminal

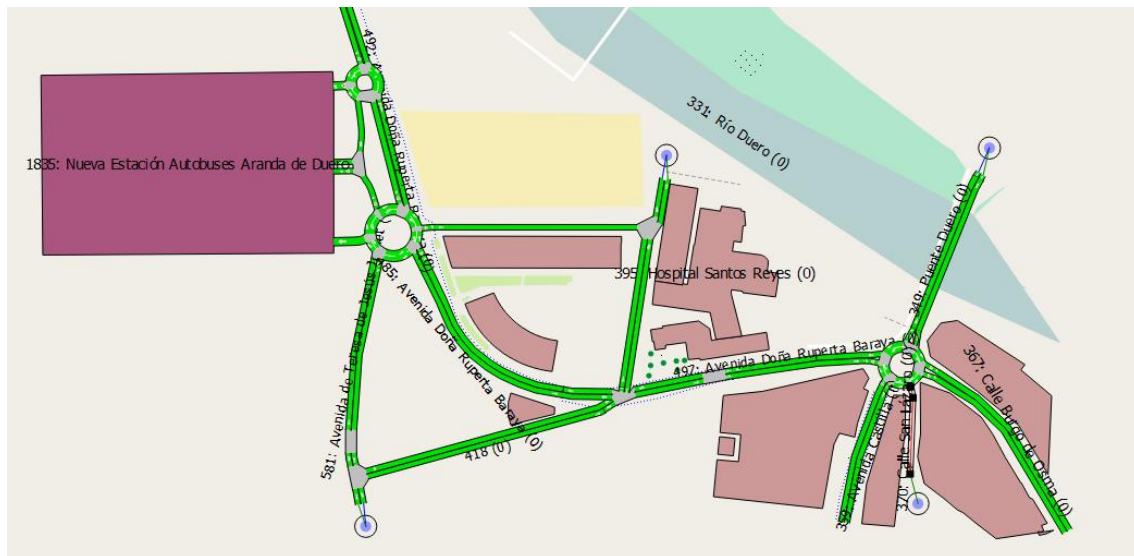


Figura 7.30: Rotondas de acceso a la nueva terminal

Se muestra en la Figura 7.31 una imagen más en detalle de dichos accesos de la nueva terminal.

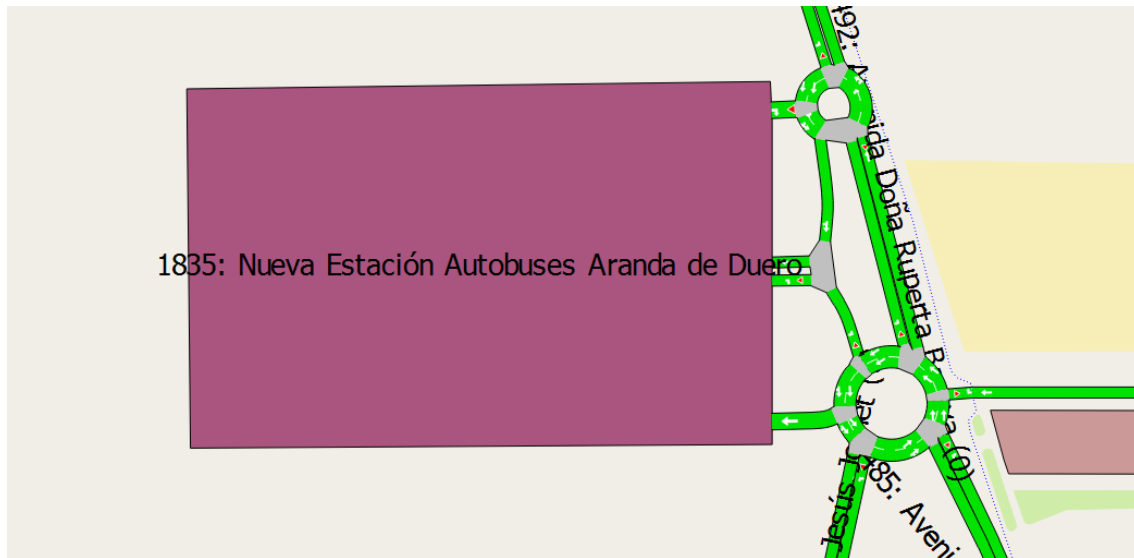


Figura 7.31: Detalle de acceso al a nueva terminal

Se puede ver a simple vista que con estas medidas se elimina el conflicto de los giros de los autobuses para acceder a la terminal, haciendo que de esta forma no invadan ningún carril de sentido contrario ni tengan que ceder el paso en vías de doble sentido obstruyendo la circulación.

De igual manera al tratarse de vías con una velocidad de circulación asignada baja no se disminuye sobremanera la fluidez del tráfico por las vías pero si se reduce notablemente el riesgo de circular por ellas al sustituir los cruces que había anteriormente por estos de tipo rotonda.

#### 7.1.4.2 Eliminación del cruce semafórico

Como segunda medida correctora, se debe actuar sobre el cruce semafórico que regula la circulación entre las vías Puente Duero, Calle Burgo de Osma, Calle San Lázaro, Avenida Castilla y Avenida Doña Ruperta Baraya. Se entiende que se debe modificarlo ya que es el causante de las colas y tiempos de espera en la red. Tras estudiar diferentes alternativas, como variar los tiempos de los ciclos de dicho cruce, introducir paneles de señalización variable para redistribuir los vehículos, modificar el tipo de señalización (vertical, semafórica variable, etc.), introducir una intersección de tipo rotonda, etc. Se decide que la mejor solución es sustituir el cruce semafórico por uno de tipo rotonda, fundamentalmente por las siguientes razones:

- a) Existe espacio suficiente para efectuarla.
- b) Viendo los resultados de tráfico obtenidos, los flujos de las vías con gran demanda de vehículos no entrarían en conflicto o este sería mínimo, haciendo que sobre una intersección de tipo rotonda puedan circular muchos más vehículos que sobre una semafórica de manera simultánea.
- c) Fuera de las horas punta estudiadas la afluencia de vehículos no

es grande.

- d) Se disminuyen tiempos de demora con intensidad moderada-alta.
- e) Se reduce la velocidad de paso por la intersección.
- f) El coste de vigilancia y mantenimiento será menor y se añade la posibilidad del cambio de sentido.

Además, de forma general, las rotondas ofrecen una gran versatilidad, ya que pueden ser de utilidad para una gran variedad de objetivos y pueden adoptar innumerables configuraciones diferentes en función de la necesidad concreta de cada emplazamiento.

En efecto, no solo pueden resultar útiles desde el punto de vista del tráfico, sino que se pueden abordar respondiendo a necesidades relacionadas con los costes de implantación o mantenimiento, la seguridad de los usuarios, el impacto ambiental o la búsqueda de plusvalías para las zonas colindantes.

Su competitividad radica en las grandes posibilidades que ofrecen a cambio de un coste y una ocupación relativamente reducidos.

Fundamentalmente se sitúan en una posición ventajosa respecto al resto de intersecciones debido a que su geometría y su modo de funcionamiento hacen que esta intersección resuelva automáticamente todos los movimientos posibles, incluidos los cambios de sentido y la rectificación de errores.

Además, se sabe que su capacidad es generalmente superior frente al resto de intersecciones al mismo nivel, incluida las semaforizadas y constatando una reducción del tiempo de espera en hora punta.

Por otro lado, todo ello debe estar supeditado a que las condiciones de implantación sean adecuadas, ya que de no ser así, la rotonda podría revelarse como una mala solución para algunos casos concretos, llegándose a producir congestiones y retrasos como consecuencia de una decisión equivocada. Cosa que en este caso no ocurre.

Algunos de los posibles inconvenientes podrían ser que este tipo de intersección provoca la pérdida de prioridad en todas las vías que confluyen en ellas, reducen la velocidad de tránsito de la vía (aunque se puede entender también como un aumento de la seguridad de la misma), además de evitar el establecimiento de jerarquías viarias.

Debido a estos dos últimos párrafos y por asegurar siempre que la solución escogida es adecuada y no conlleva inconvenientes como los vistos aquí, se realizan simulaciones en los dos escenarios estudiados (matinal y vespertino), comparando los resultados obtenidos finalmente.

Se puede ver en la Figura 7.32 la situación actual del cruce y en la Figura 7.33 la alternativa llevada a cabo, a modo comparativo.

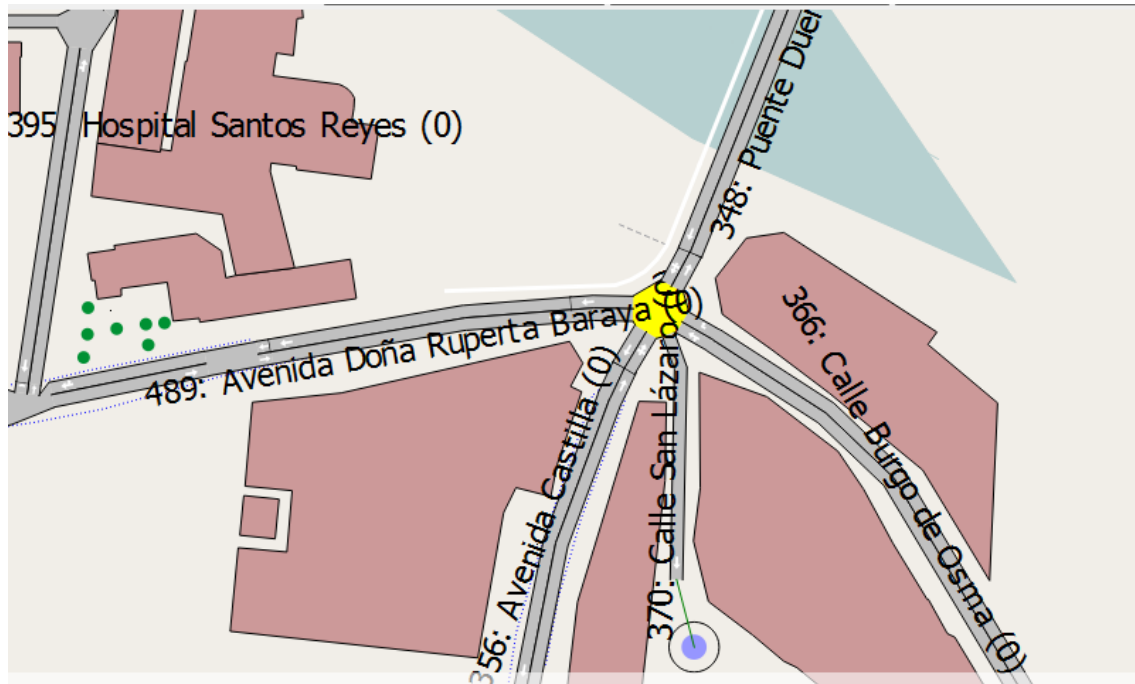


Figura 7.32: Situación actual de la red en el cruce semafórico

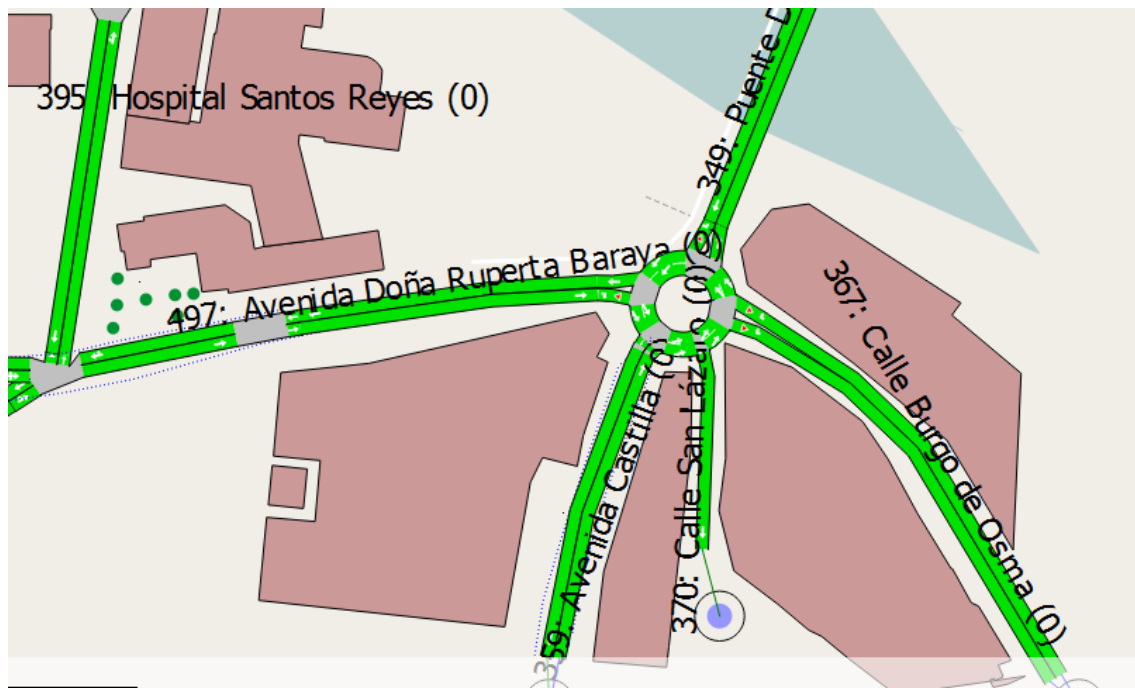


Figura 7.33: Diseño de solución de cruce con rotonda

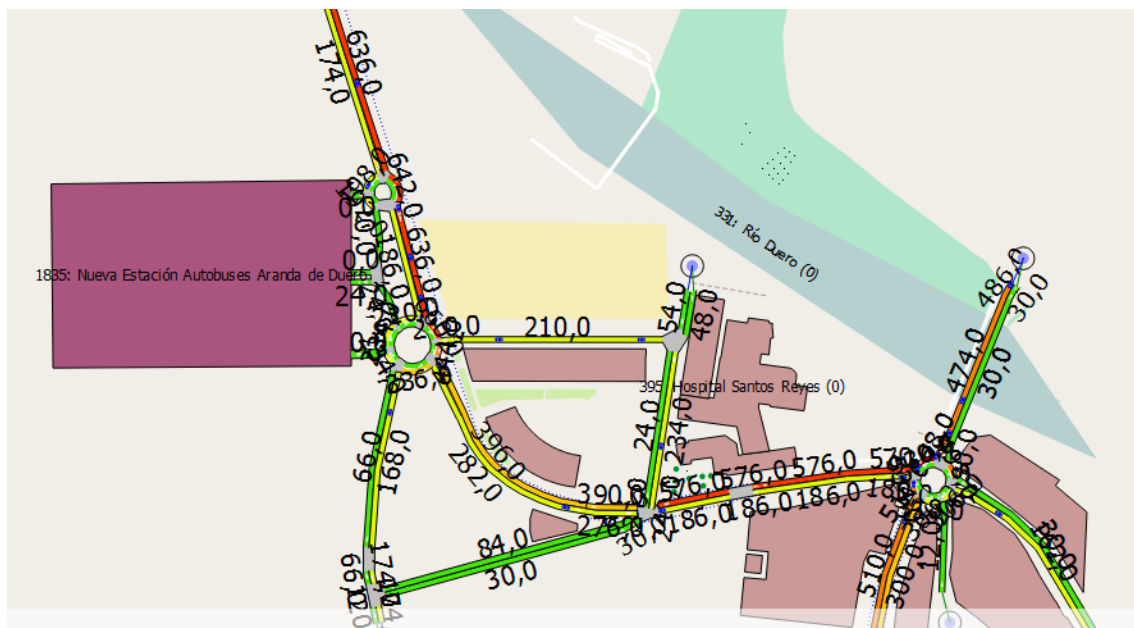
### 7.1.5 Estudio de la eficacia de la solución escogida. Simulación hora punta matinal. Análisis de tráfico.

### 7.1.5.1 Plano de flujo

Se muestra en la Figura 7.34 el plano de flujos de vehículos en veh/hora desprendido de la simulación de la hora punta matinal corregida. En él se observa que no hay gran diferencia con los flujos de la simulación vista en el apartado 7.1.2.1, ya que siguen pasando más o menos los mismos vehículos por las vías, aunque ahora lo hagan de una forma mucho más fluida.

Al tratarse de la hora punta de salida del núcleo urbano se observa claramente que las vías con mayor flujo de vehículos son precisamente esas, es decir, las utilizadas por los usuarios para dirigirse a sus respectivos puestos de trabajo.

Además se muestran los valores de los flujos en cada una de las vías con números. Se puede observar también que la rotonda que se ha situado en el cruce que antes se controlaba por medio de semáforos sigue soportando un gran flujo de vehículos, cosa normal ya que en todas las simulaciones participan un número muy similar de vehículos.



**Figura 7.34: Plano de flujo situación corregida matinal**

#### 7.1.5.2 Plano de tiempo de demora

En la Figura 7.35 se muestra el plano de tiempo de demora correspondiente a la situación de estudio.



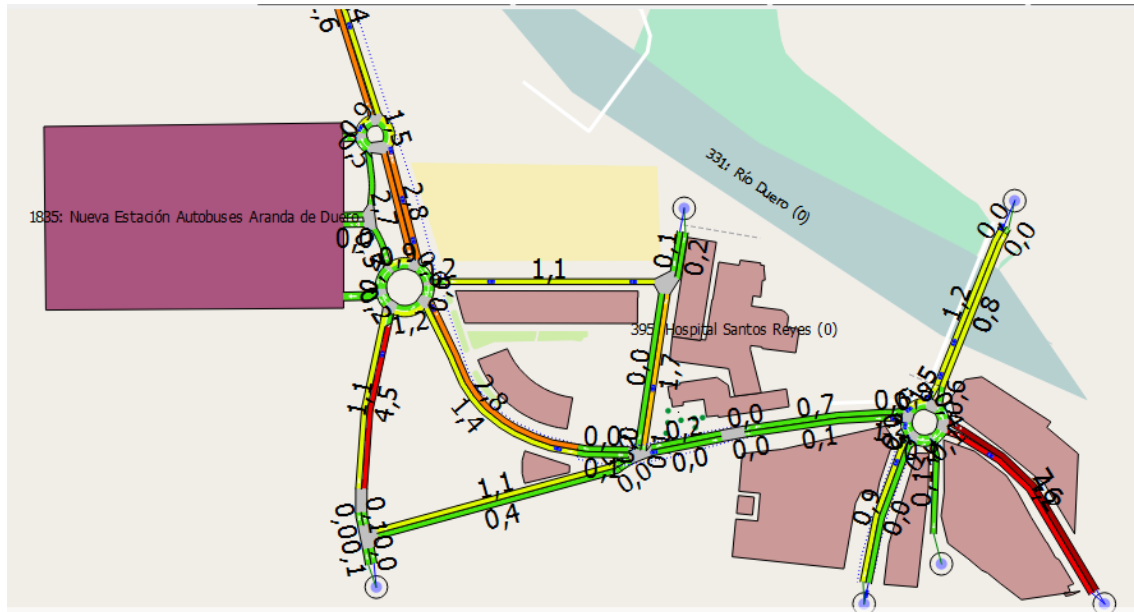


Figura 7.35: Plano de tiempo de demora situación corregida matinal

Se ve que de manera general se marca en rojo las entradas a las rotondas creadas, simbolizando tiempos de demora mayores que en el resto, y en verde o amarillos el resto de la red. En cualquier caso si se miran los valores mostrados por números en cada una de las vías se ve que los tiempos de demora en este caso son mínimos en comparación con los que se tenían antes de corregir la red, por lo que en este aspecto la red ha mejorado notablemente.

### 7.1.5.3 Plano de velocidad

La Figura 7.36 muestra el plano de velocidad de esta simulación.

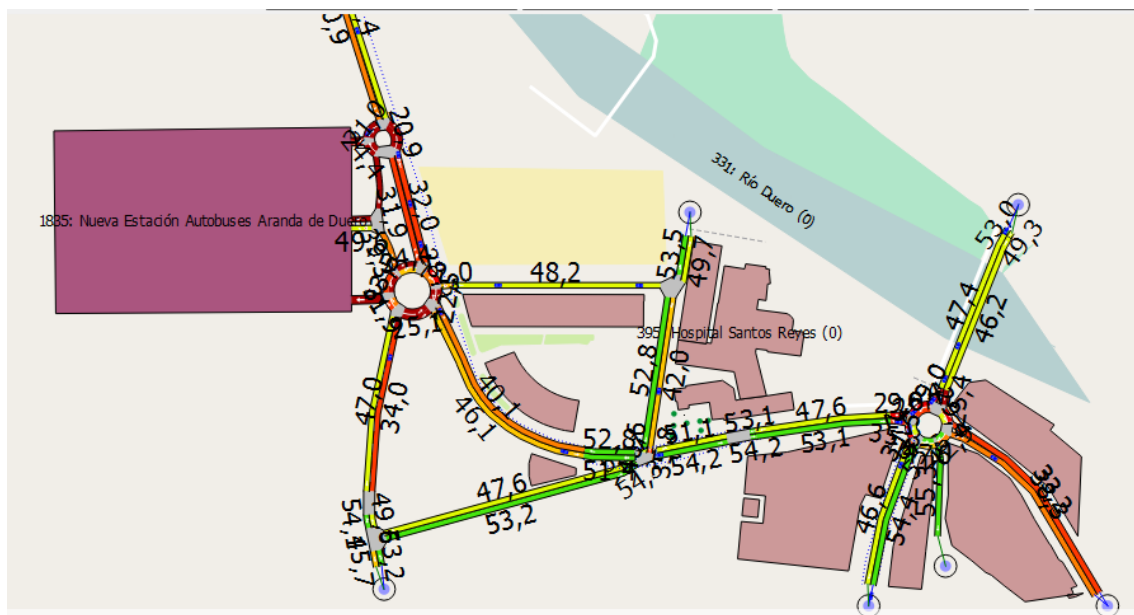


Figura 7.36: Plano de velocidad situación corregida matinal

En este caso se ve que los puntos de circulación más lenta son en las zonas próximas a las rotondas. En cualquier caso son velocidades altas en comparación con las que se tenían en los puntos de conflicto en la red antes de introducir las correcciones, ahora se tiene una velocidad mínima de en torno a 20 Km/h cuando antes era de 2 Km/h, por lo que se entiende que es una buena solución en cuanto a lo que afecta a esta variable también.

#### 7.1.5.4 Tabla resumen de los resultados obtenidos

Los avances obtenidos con las mejoras efectuadas se verán plasmados de una forma muy clara en la Tabla 7.4, sobre todo al compararla con la Tabla 7.2 que se obtuvo antes de introducir las correcciones en la red.

Tabla 7.4: Tabla resumen situación corregida matinal

Serie Temporal	Valor	Unidades
Cola Media - Car	0,59	veh
Cola Virtual Máxima - Car	2	veh
Cola Virtual Media - Car	0,03	veh
Contaje de Entrada - Car	1435	veh
Densidad - Car	5,39	veh/km
Distancia Total de Viaje - Car	696,9	km
Flujo - Car	1427	veh/h
Giros Perdidos - Car	10	
Tiempo de Demora - Car	20,72	seg/km
Tiempo de Parada - Car	3,8	seg/km
Tiempo de Viaje - Car	90,58	seg/km
Tiempo Total de Viaje - Car	17,64	h
Vehículos Dentro - Car	22	veh
Vehículos Esperando Entrar - Car	0	veh
Vehículos Perdidos Dentro - Car	0	veh
Vehículos Perdidos Fuera - Car	0	veh
Velocidad - Car	40,53	km/h
Velocidad Armónica - Car	39,75	km/h

#### 7.1.5.5 Gráficas relevantes asociadas

Se exponen a continuación una serie de figuras que contienen gráficos de la evolución temporal durante la hora de estudio de las principales variables medidas por la aplicación. Son:

- Gráfico de cola media corregida matinal (Figura 7.37).
- Gráfico de densidad corregida matinal (Figura 7.38).
- Gráfico de flujo corregida matinal (Figura 7.39).
- Gráfico de número de paradas corregida matinal (Figura 7.40).
- Gráfico de tiempo de demora corregida matinal (Figura 7.41).
- Gráfico de tiempo de viaje corregida matinal (Figura 7.42).



- Gráfico de velocidad corregida matinal (Figura 7.43).

Aunque su lectura es directa, se hace un breve análisis de los mismos al finalizar este apartado comentando las situaciones más relevantes observadas en los propios gráficos.

Cabe mencionar, que al hacer una lectura de estos gráficos se puede obtener una idea de cómo va evolucionando la hora de estudio a medida que transcurren los minutos. Estas variaciones, al tratarse de un sistema estocástico, dependerán de todo aquello que ha ocurrido hasta el instante evaluado y de lo que designe que va a ocurrir en las decisiones siguientes un sistema arbitrario manejado por la propia aplicación. Por lo que dos simulaciones del mismo estudio no tienen por qué dar como resultados las mismas gráficas, aunque si deben parecerse ya que las variables y factores de partida son los mismos en ambas.

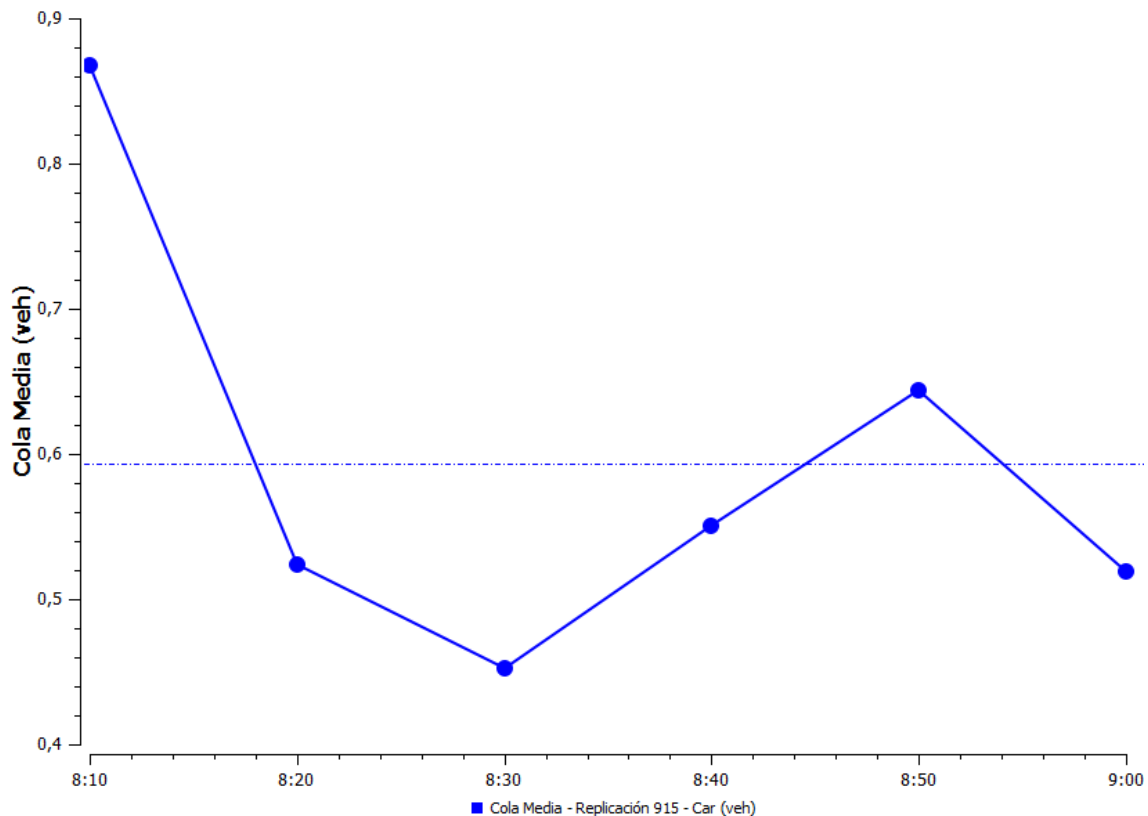


Figura 7.37: Gráfico cola media corregida matinal

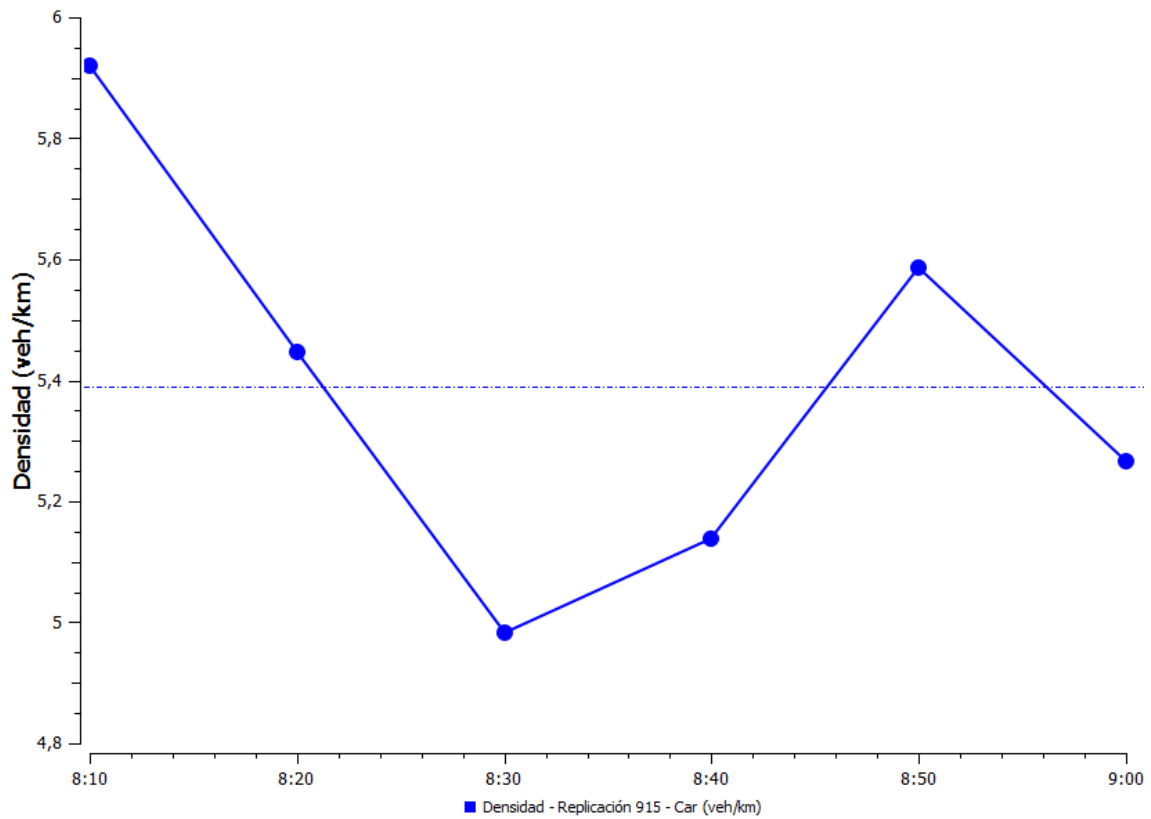


Figura 7.38: Gráfico densidad corregida matinal

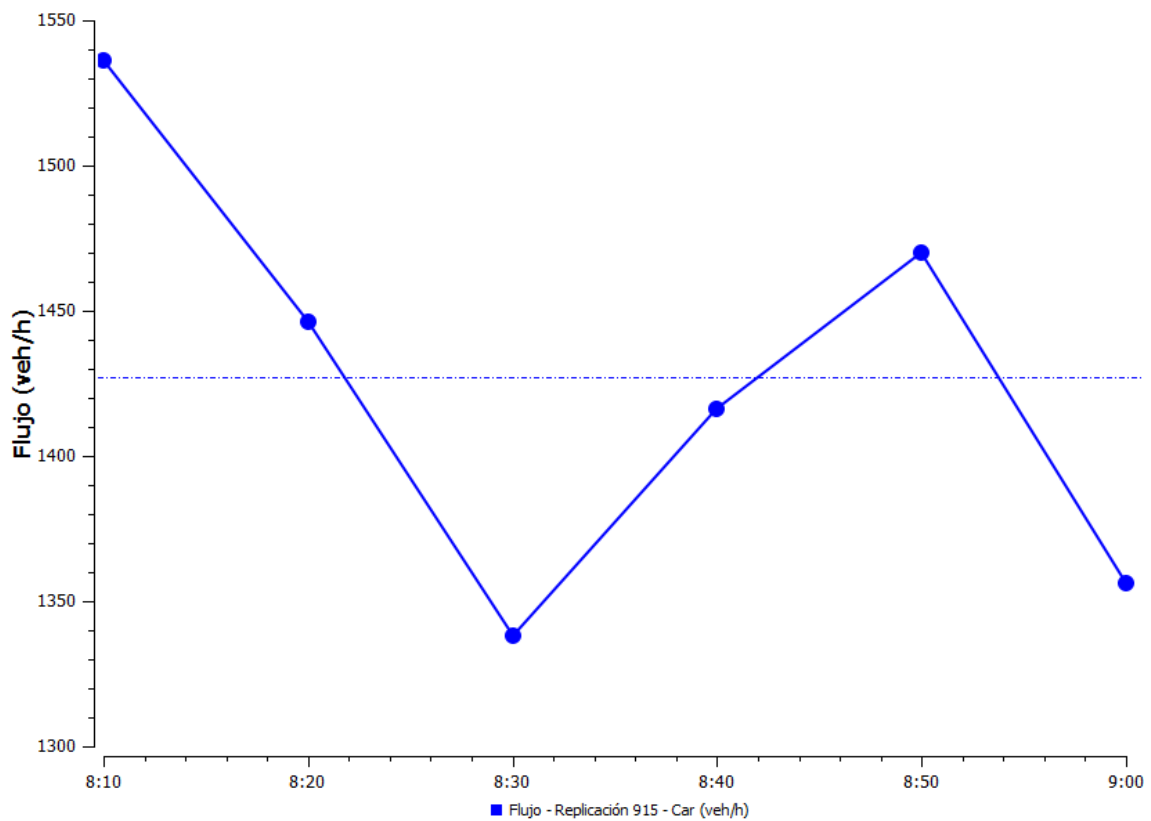


Figura 7.39: Gráfico flujo corregida matinal

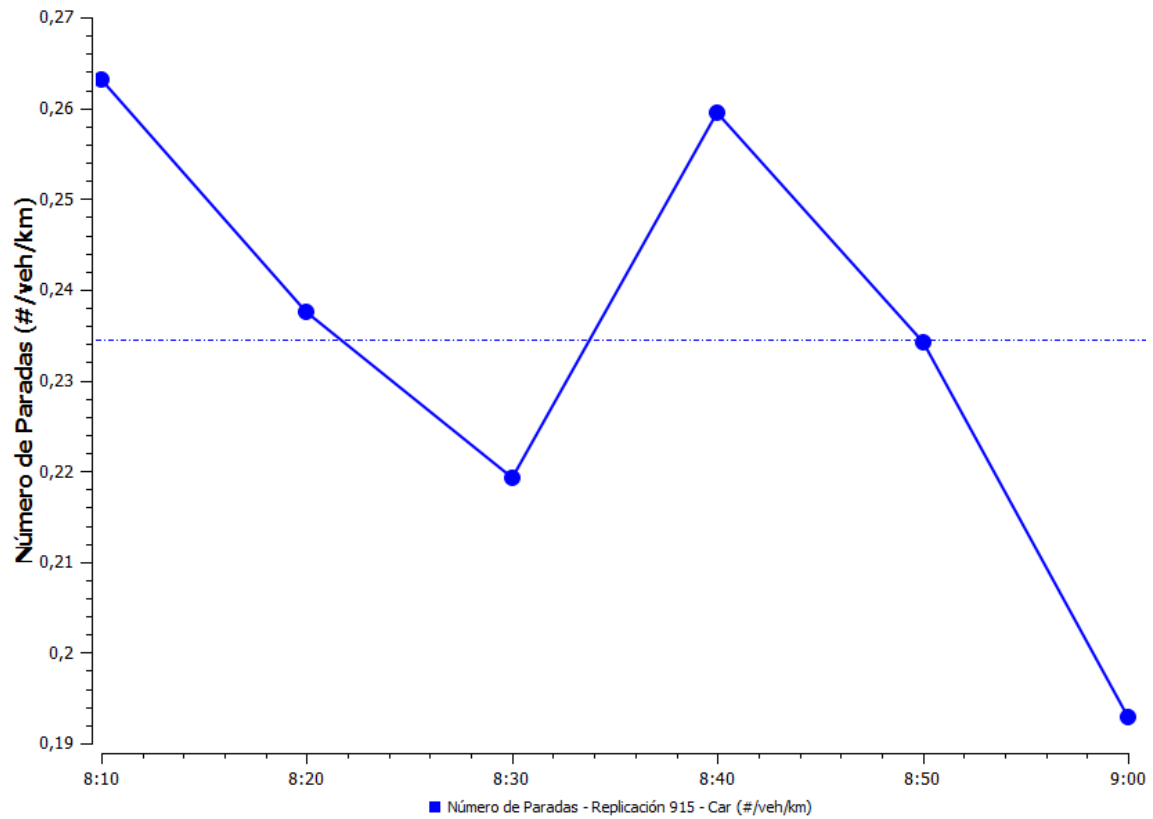


Figura 7.40: Gráfico número de paradas corregida matinal

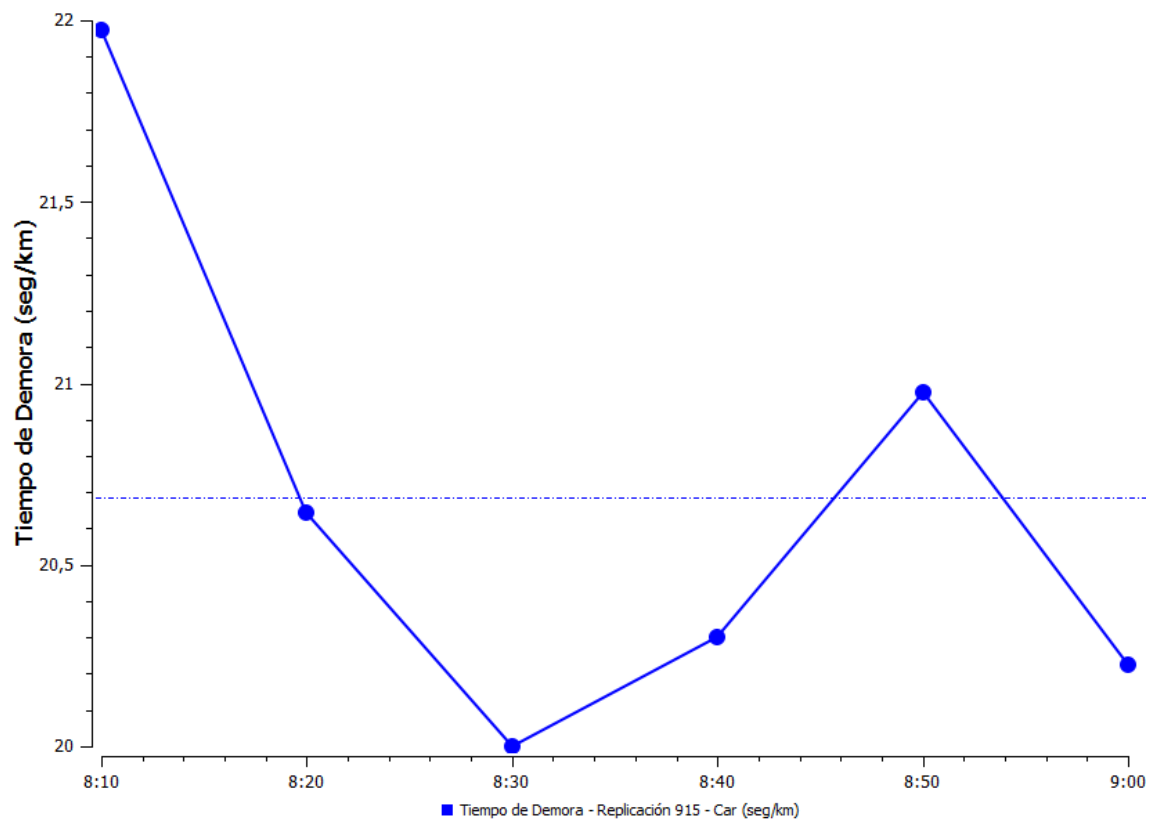


Figura 7.41: Gráfico tiempo de demora corregida matinal

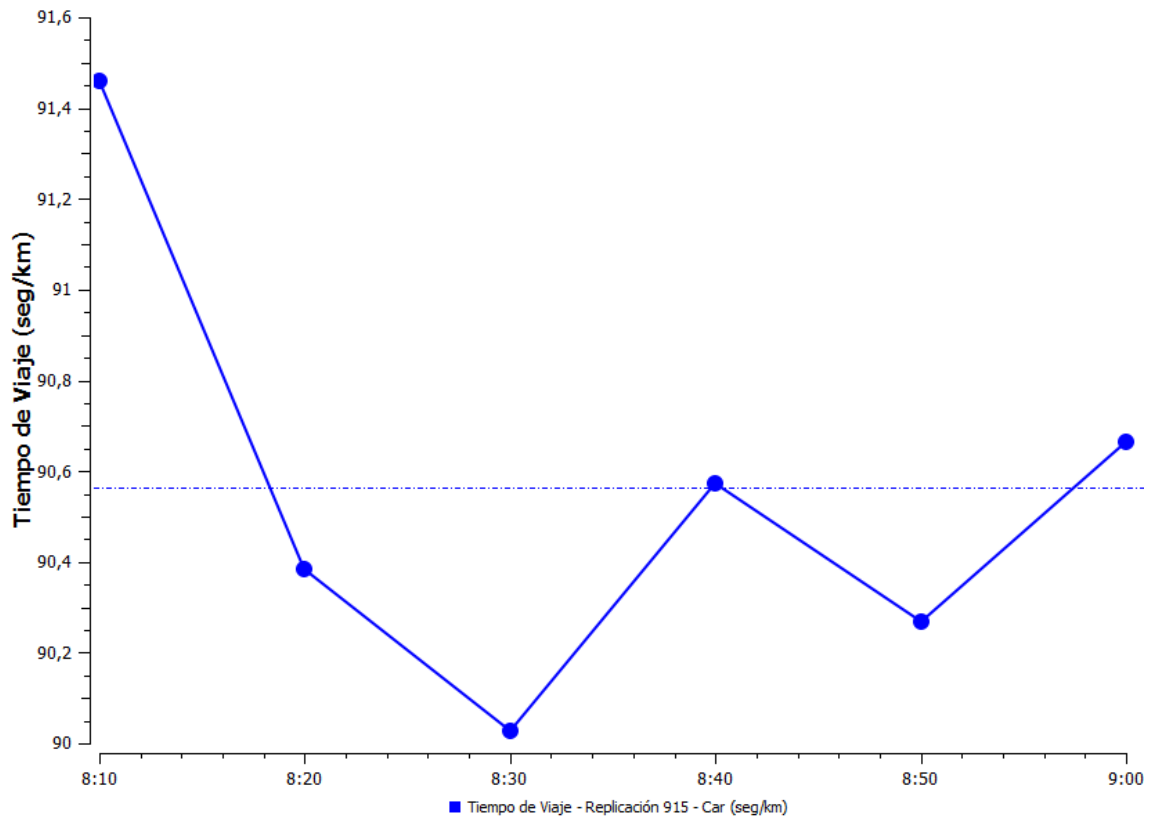


Figura 7.42: Gráfico tiempo de viaje corregida matinal

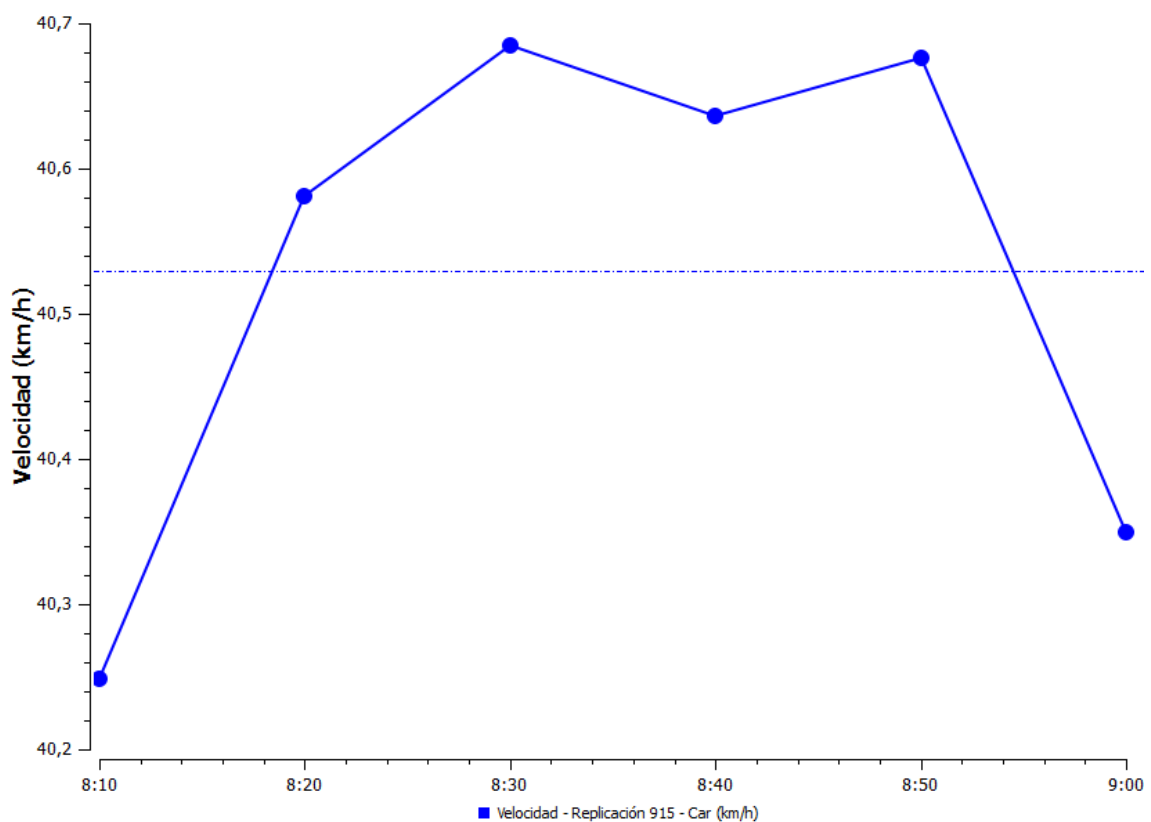


Figura 7.43: Gráfico velocidad corregida matinal

En cuanto a un estudio de las gráficas mostradas, al igual que ocurría con las gráficas del apartado 7.1.2.5, las gráficas indican que la circulación tiende a mejorar, aunque con altibajos a lo largo del periodo de tiempo en cuestión. Esto lo indican, en el comienzo, valores de cola, densidad, flujo, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos altos y también los valores bajos de velocidad, siempre teniendo en cuenta que cuando se habla de valores altos o bajos se está hablando dentro del rango mostrado por la gráfica. Sin embargo se ve que las gráficas van evolucionando hacia valores indicativos de una mejora de la circulación hacia el final de la hora de estudio, obteniéndose el valor de velocidad más alto del periodo de tiempo y los valores de cola, densidad, flujo, tiempo de parada, tiempo de demora y tiempo de viaje de vehículos más bajos, aunque bien es cierto que en el final la situación vuelve a tender a la del comienzo de la hora punta. Más adelante se podrá ver una tabla comparativa de las gráficas obtenidas con la simulación de la situación actual y con la simulación de la situación corregida.

### **7.1.1 Estudio de la eficacia de la solución escogida. Simulación hora punta vespertina. Análisis de tráfico.**

#### **7.1.1.1 Plano de flujo**

Se muestra en la Figura 7.44 el plano de flujos de vehículos en veh/hora desprendido de la simulación efectuada para este apartado. En él se observa que no hay gran diferencia con los flujos de la simulación vista en el apartado 7.1.3.1 referente a la situación sin corregir, ya que siguen pasando más o menos los mismos vehículos por las vías, aunque ahora lo hagan de una forma mucho más fluida.

Al tratarse de la hora punta de retorno al núcleo urbano se observa claramente que las vías con mayor flujo de vehículos son precisamente esas, es decir, las utilizadas por los usuarios para dirigirse a sus respectivos domicilios en el centro de la ciudad.

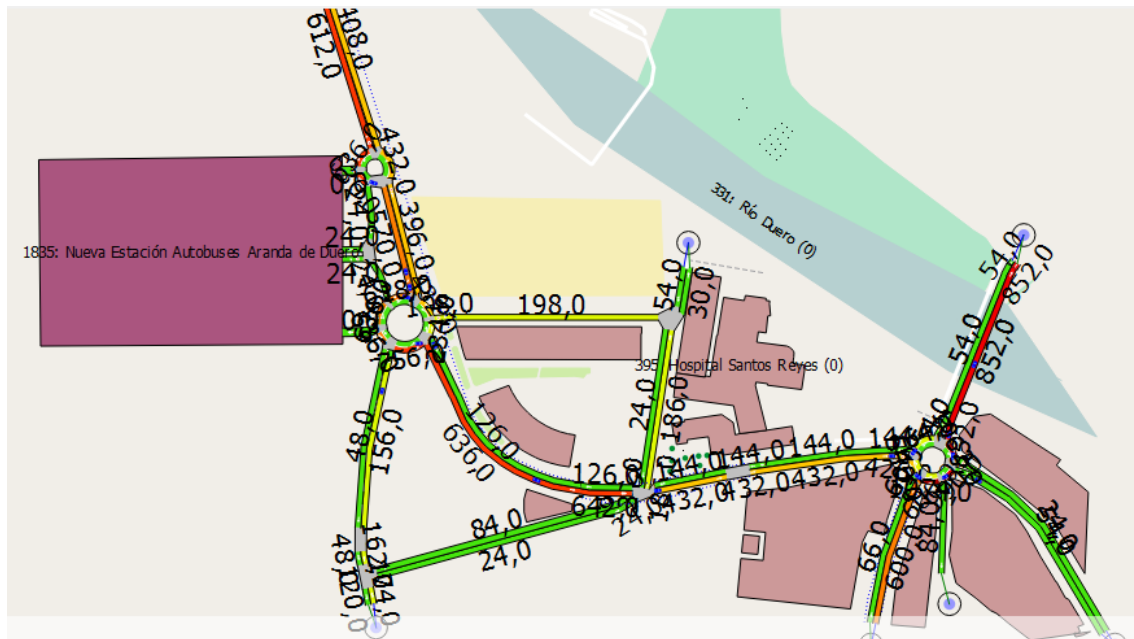


Figura 7.44: Plano de flujo situación corregida vespertina

### 7.1.1.2 Plano de tiempo de demora

En la Figura 7.45 se muestra el plano de tiempo de demora correspondiente a la situación estudiada en este apartado.

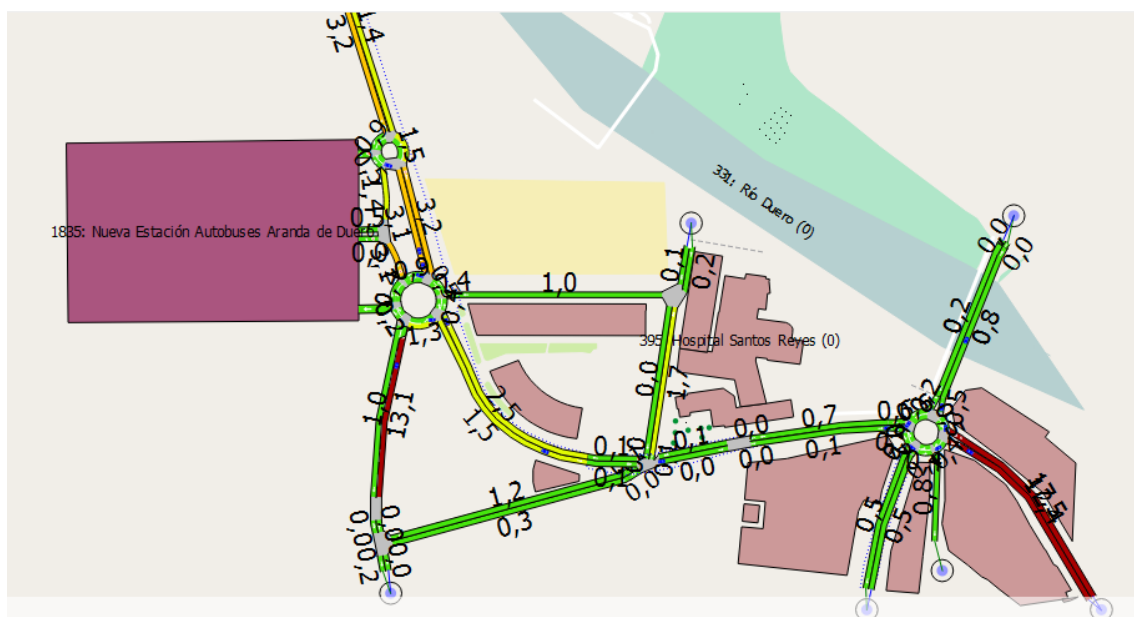


Figura 7.45: Plano de tiempo de demora situación corregida vespertina

Se observa que de manera general se marca en rojo, naranjas o amarillos las entradas a las rotondas creadas, simbolizando tiempos de demora mayores que en el resto, y en verde el resto de la red. En cualquier caso si se revisan los valores queda claro que los tiempos de demora en este caso son mínimos en comparación con los que se tenía en el apartado 7.1.3.2, ya que

ahora el mayor tiempo de demora son 17 segundos cuando en el caso anterior eran de incluso 104 segundos.

### 7.1.1.3 Plano de velocidad

La Figura 7.46 muestra el plano de velocidad de la simulación estudiada en este apartado.

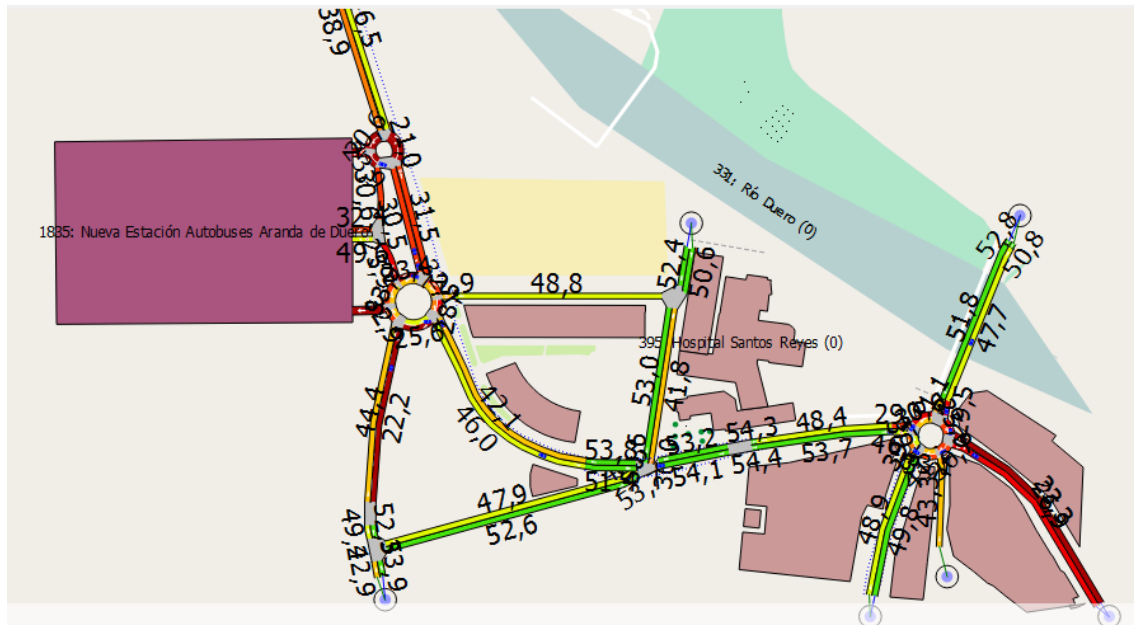


Figura 7.46: Plano de velocidad situación corregida vespertina

En este caso se ve que los puntos de menor velocidad de circulación coinciden con las zonas próximas a las rotondas, pero en cualquier caso son velocidades altas en comparación con las que se tenían en los puntos de conflicto en la red en el apartado 7.1.3.3 antes de introducir las correcciones. Por ejemplo, ahora se da una velocidad mínima de en torno a 23 Km/h cuando en dicho apartado era de 2 Km/h, por lo que se entiende que las mejoras introducidas son una buena solución para la hora punta vespertina al igual que lo eran para la hora punta matinal.

### 7.1.1.4 Tabla resumen de los resultados obtenidos

Los avances obtenidos con las mejoras efectuadas se verán plasmados de una forma muy clara en la Tabla 7.5, sobre todo al compararla con la Tabla 7.3 que se obtuvo antes de introducir las correcciones en la red.



Tabla 7.5: Tabla resumen situación corregida vespertina

Serie Temporal	Valor	Unidades
Cola Media - Car	0,58	veh
Cola Virtual Máxima - Car	2	veh
Cola Virtual Media - Car	0,06	veh
Contaje de Entrada - Car	1479	veh
Densidad - Car	5,40	veh/km
Distancia Total de Viaje - Car	686,15	km
Flujo - Car	1476	veh/h
Giros Perdidos - Car	23	
Número de Paradas - Car	0,17	#/veh/km
Tiempo de Demora - Car	21,55	seg/km
Tiempo de Viaje - Car	91,65	seg/km
Tiempo Total de Viaje - Car	17,65	h
Vehículos Dentro - Car	17	veh
Vehículos Esperando Entrar - Car	0	veh
Vehículos Perdidos Dentro - Car	0	veh
Vehículos Perdidos Fuera - Car	0	veh
Velocidad - Car	40,36	km/h
Velocidad Armónica - Car	39,28	km/h

#### 7.1.1.5 Gráficas relevantes asociadas

Se exponen a continuación una serie de figuras que contienen gráficos de la evolución temporal durante la hora de estudio de las principales variables medidas por la aplicación. Son:

- Gráfico de cola media corregida vespertina (Figura 7.47).
- Gráfico de densidad corregida vespertina (Figura 7.48).
- Gráfico de flujo corregida vespertina (Figura 7.49).
- Gráfico de número de paradas corregida matinal (Figura 7.50).
- Gráfico de tiempo de demora corregida vespertina (Figura 7.51).
- Gráfico de tiempo de viaje corregida vespertina (Figura 7.52).
- Gráfico de velocidad corregida vespertina (Figura 7.53).

Se hace un breve análisis de los mismos al finalizar este apartado comentando las situaciones más relevantes observadas en los propios gráficos.

Se puede obtener de estos gráficos una idea de cómo evoluciona la hora de estudio en el tiempo. Al tratarse de un sistema estocástico, el resultado dependen de lo que ha ocurrido hasta el instante evaluado y de lo que designe que va a ocurrir en las decisiones siguientes un sistema arbitrario manejado por la propia aplicación. Por lo que dos simulaciones del mismo estudio no tienen por qué dar como resultados las mismas gráficas, aunque si deben parecerse ya que las variables y factores de partida son los mismos en ambas.

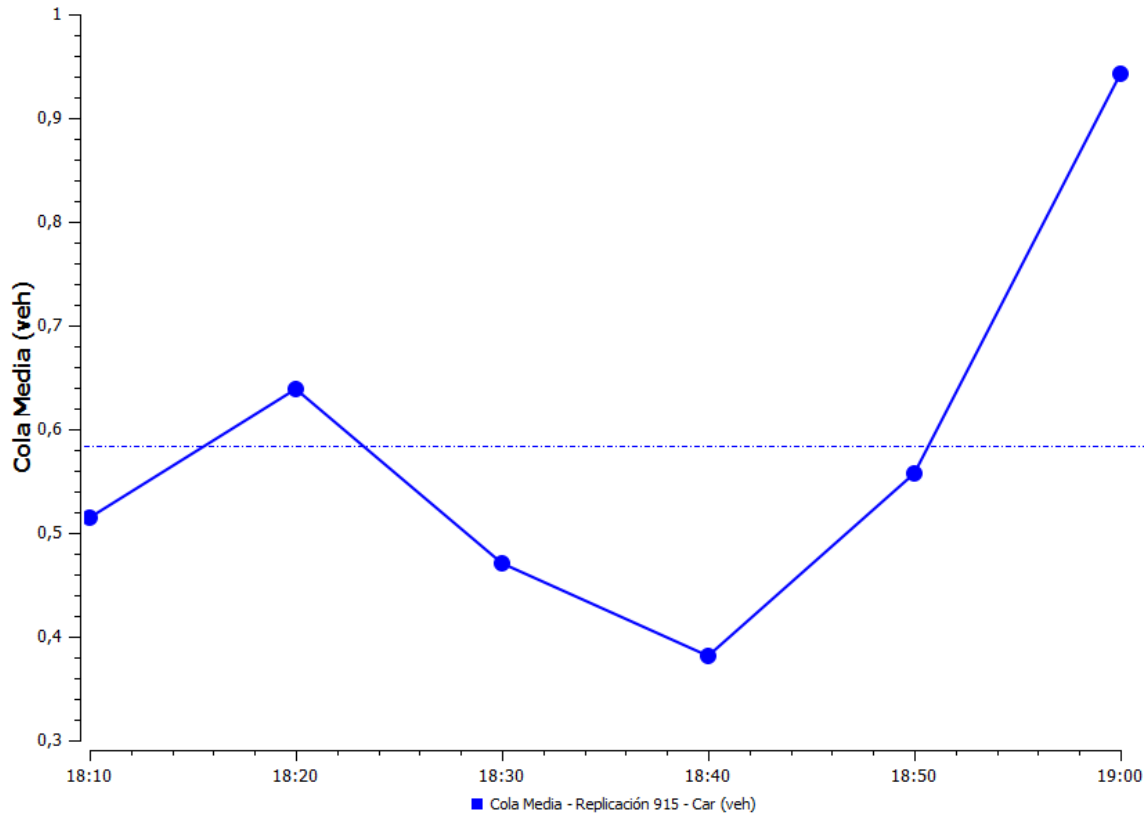


Figura 7.47: Gráfico cola media corregida vespertina

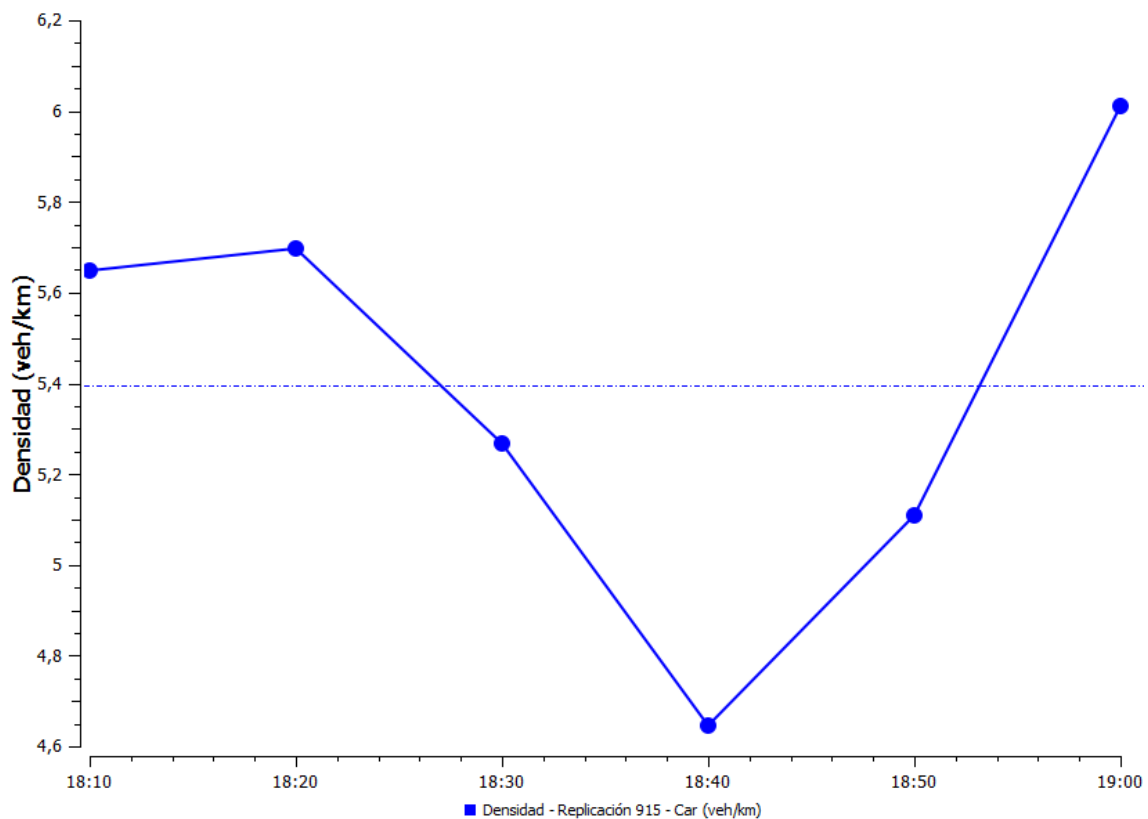


Figura 7.48: Gráfico densidad corregida vespertina

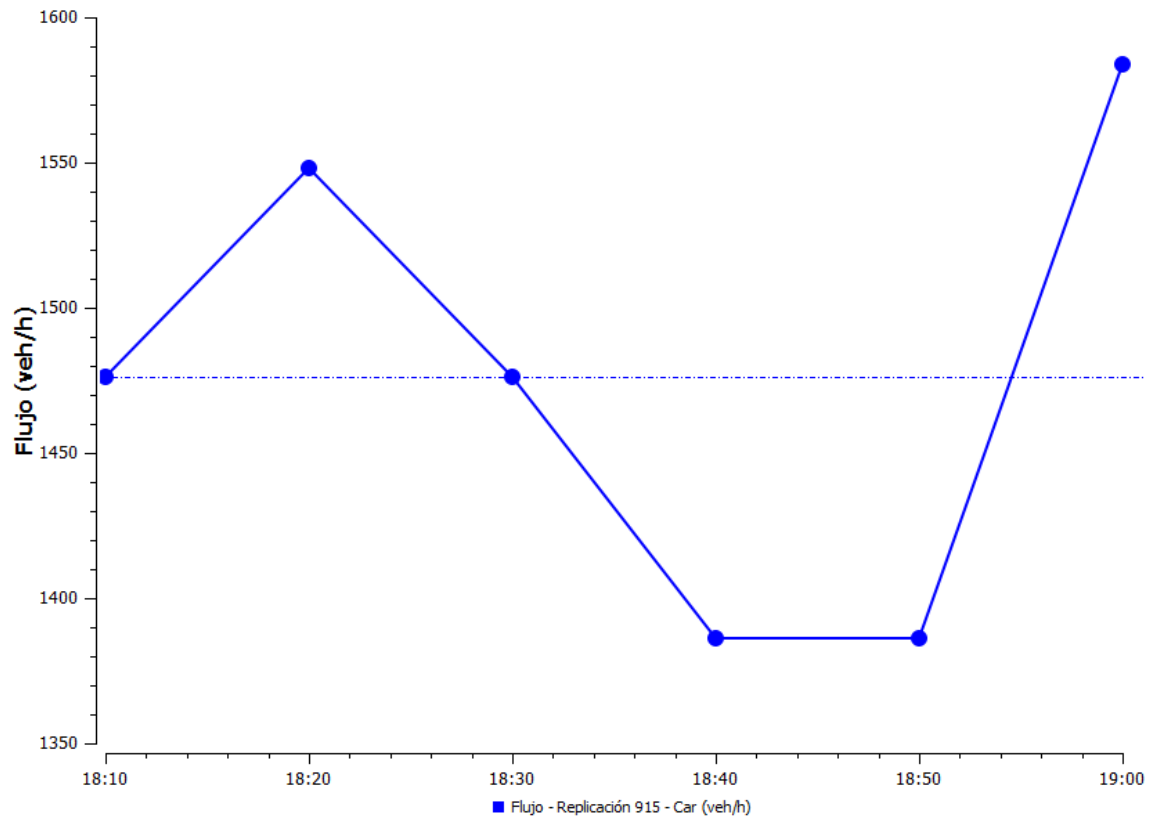


Figura 7.49: Gráfico flujo corregida vespertina

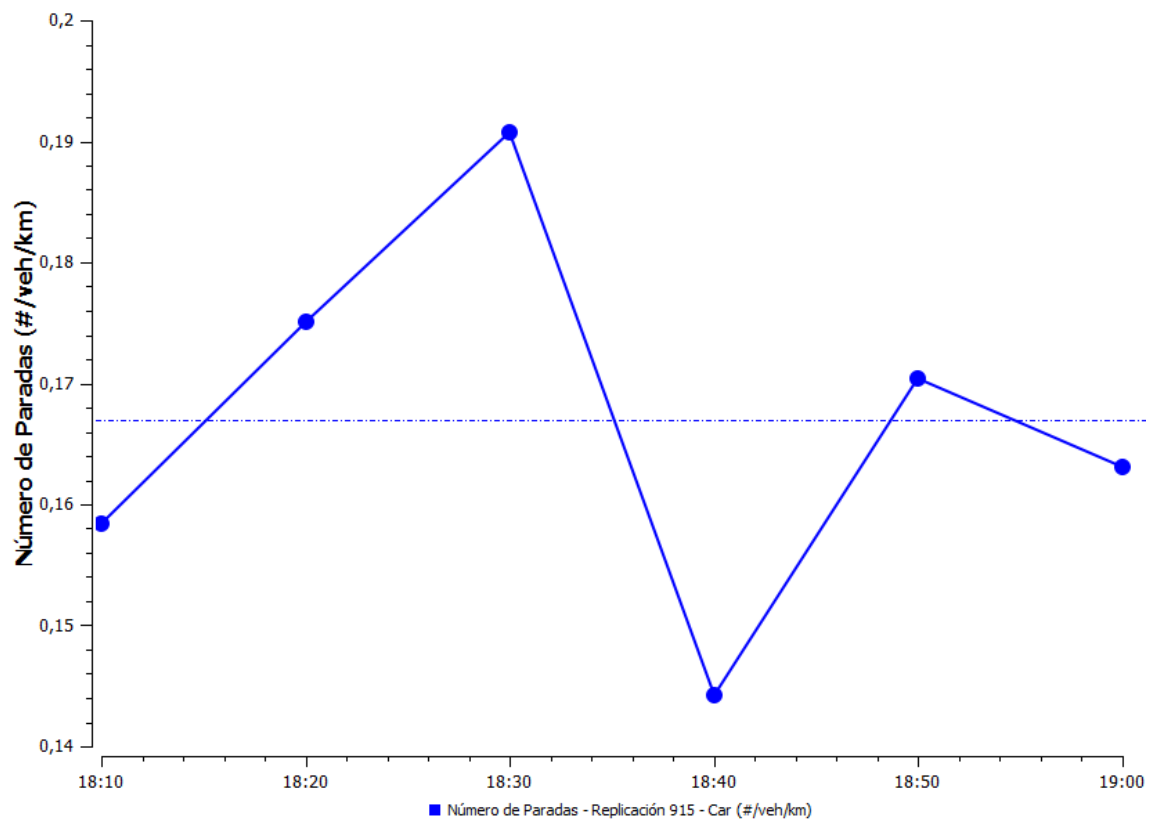


Figura 7.50: Gráfico número de paradas corregida vespertina

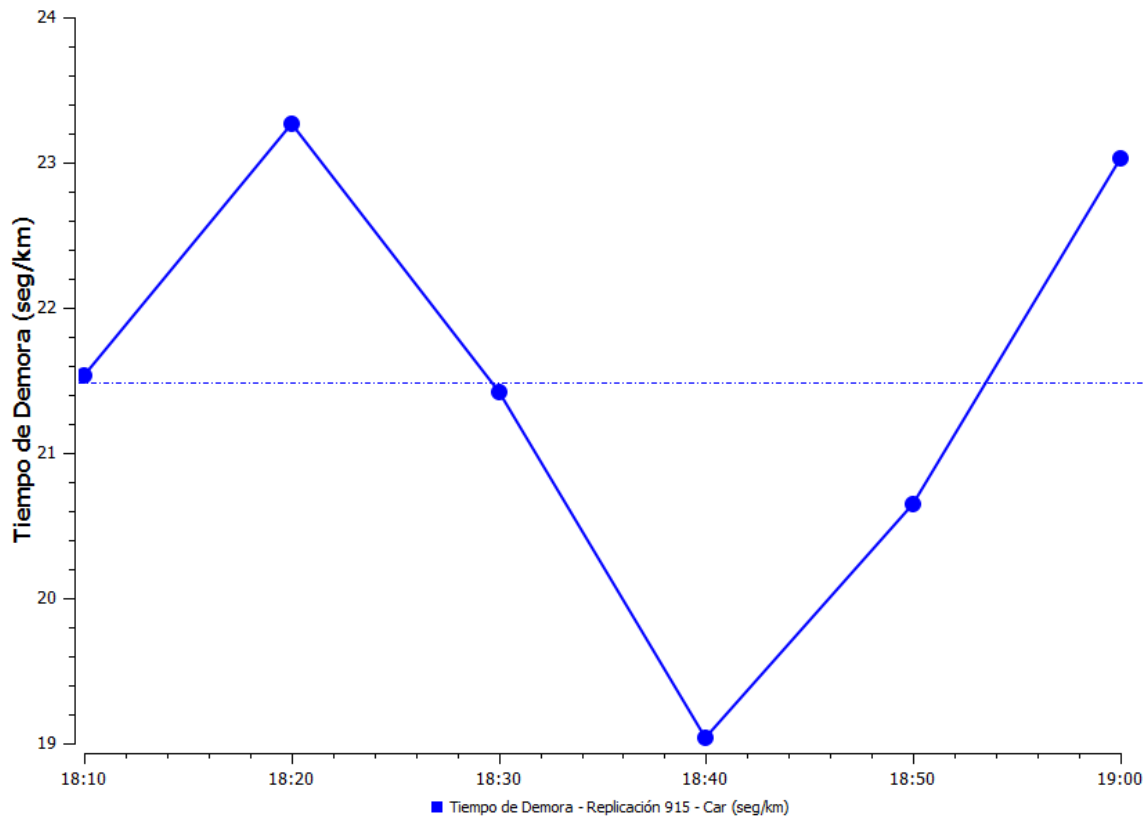


Figura 7.51: Gráfico tiempo de demora corregida vespertina

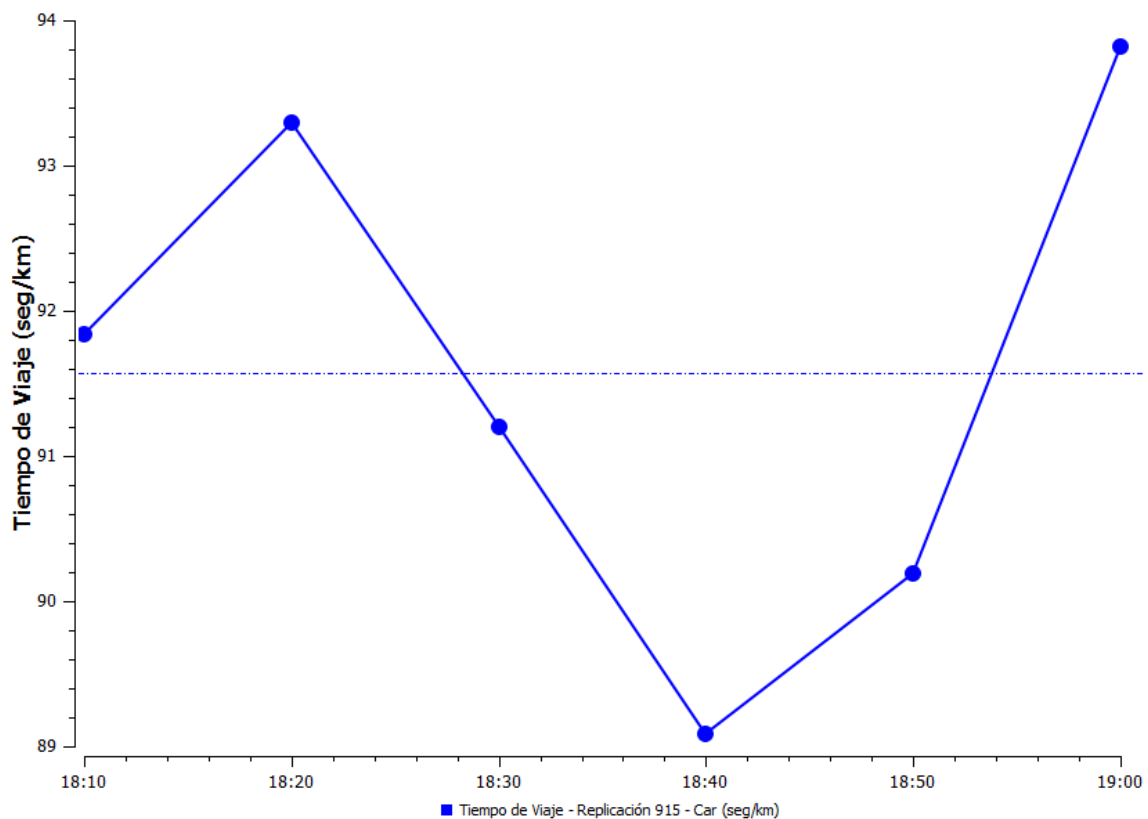


Figura 7.52: Gráfico tiempo de viaje corregida vespertina

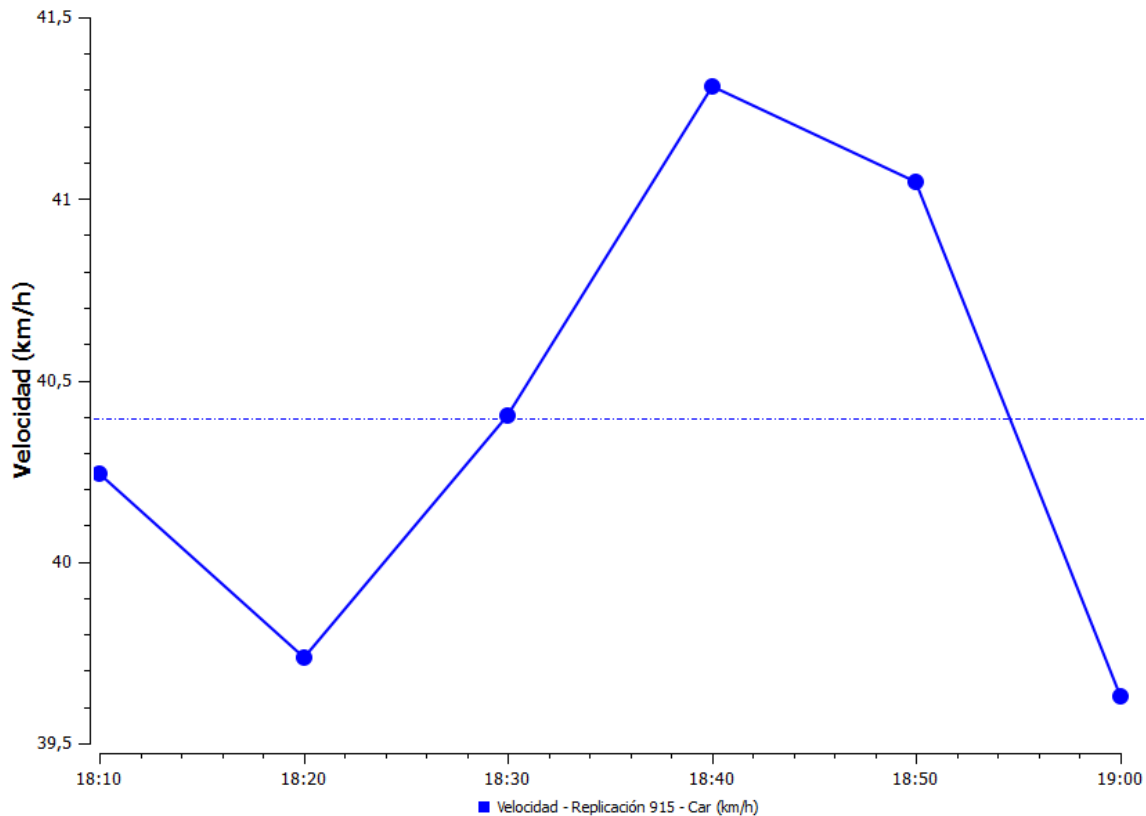


Figura 7.53: Gráfico velocidad corregida vespertina

En este caso no se sigue una tendencia rigurosa a lo largo del periodo del tiempo estudiado. Se puede ver que las gráficas indican un empeoramiento de la circulación en los primeros 20 minutos, luego la situación mejora hasta las 18:40 y después la situación vuelve a empeorar, para saber esto únicamente se deben seguir los mismo criterios mostrados a la hora de valorar las gráficas en situaciones mostradas en apartados correspondientes a otras situaciones de estudio. En el siguiente apartado se verán unas tablas comparativas de las gráficas obtenidas con la simulación de la situación actual y con la simulación de la situación corregida.

### 7.1.2 Conclusiones de los resultados obtenidos

Para analizar los resultados obtenidos se van a comparar los gráficos extraídos para las situaciones estudiadas antes de introducir las mejoras con los obtenidos en las simulaciones de la situación corregida. Esto se hace a partir de una tabla resumen en la que esta comparación será muy visual y directa.

La Tabla 7.6 muestra la comparación entre los resultados obtenidos para la situación actual matinal antes de corregir y después, y la Tabla 7.7 realiza la misma comparación pero en ese caso para la hora punta vespertina.

Tabla 7.6: Tabla resumen resultados hora punta matinal

Variable	Valor Actual		Valor Corregido		Conclusión
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
<i>Cola media (veh)</i>	38,4	43,8	0,45	0,87	Mejora
<i>Densidad (veh/Km)</i>	15,7	17,8	4,95	8,90	Mejora
<i>Flujo (veh/h)</i>	1250	1482	1330	1540	-
<i>Nº paradas (#/veh/Km)</i>	1,135	1,265	0,192	0,263	Mejora
<i>T. demora (seg/Km)</i>	349	385	20	22	Mejora
<i>T. viaje (seg/Km)</i>	417	453	90,00	91,45	Mejora
<i>Velocidad (Km/h)</i>	20,25	21,65	40,25	40,69	Mejora

Tabla 7.7: Tabla resumen resultados hora punta vespertina

Variable	Valor Actual		Valor Corregido		Conclusión
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
<i>Cola media (veh)</i>	42	76	0,38	0,96	Mejora
<i>Densidad (veh/Km)</i>	19	32	4,65	6,05	Mejora
<i>Flujo (veh/h)</i>	1325	1450	1380	1590	-
<i>Nº paradas (#/veh/Km)</i>	1,24	1,66	0,14	0,19	Mejora
<i>T. demora (seg/Km)</i>	270	400	19,0	23,3	Mejora
<i>T. viaje (seg/Km)</i>	337	470	89	94	Mejora
<i>Velocidad (Km/h)</i>	13,0	18,5	39,65	41,30	Mejora

Se puede ver que se mejoran los valores de todas las variables con las medidas correctoras aplicadas, por lo que se puede estar satisfecho con las mismas. Además se puede observar que estas mejoras son muy considerables con respecto a la situación de partida, haciendo que el tráfico en la zona cercana a la terminal sea con la aplicación de estas medidas muy fluido, dinámico y que aporta un alto nivel de servicio a la red estudiada, cosa que no ocurría anteriormente debido sobre todo al cuello de botella provocado por ese

cruce semafórico que se modificó por la rotonda.

Como ejemplo, se puede ver que la densidad se reduce del orden de 5 veces, el número de paradas se hace 8 veces más pequeño, el tiempo de viaje es 5 veces más corto y la velocidad media de circulación aumenta al doble. Con lo que se mejoran todas las variables fundamentales que afectan al tráfico de la zona.

Por otro lado los accesos a la terminal tanto por parte de los usuarios como por parte de los autobuses queda totalmente corregido, sobre todo en cuanto a las invasiones de carriles que se producía en la situación de partida por parte de los autobuses a la hora de realizar el giro en el acceso y la salida de la terminal, con la solución implementada esas maniobras ahora se realiza de una forma totalmente eficiente y segura gracias a las dos rotondas diseñadas y al ramal secundario añadido para el acceso a la terminal de los usuarios.

En definitiva, se llega a la conclusión de que las medidas llevadas a cabo con la finalidad de mejorar la red existente para la terminal actual han sido efectivas, y se refrenda dicha efectividad por medio de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, los cuales quedan contrastados en la Tabla 7.6 y en la Tabla 7.7.



## **8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



- [1] Mauttone, A. (2005). *Optimización de Recorridos y Frecuencias en Sistemas de Transporte Público Urbano Colectivo*. Tesis de Maestría. Departamento de Investigación Operativa (Instituto de Computación). Facultad de Ingeniería. Universidad de la República (Uruguay).
  - [2] Ceder, A y Wilson, N. H. M. (1986). ). *Bus Network Design*. Transportation Research, Vol 20B (4), 331-334.
  - [3] Mandl, C. E. (1979). *Evaluation and optimization of urban public transportation networks*. European Journal of Operational Research, Vol 5, 396-404.
  - [4] Baaj, M. H. y Mahmassani, H. S. (1991). *An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design*. Journal of Advanced Transportation, Vol 25(2), 187-210.
  - [5] Mauttone, A., Cancela, H. y Urquhart, M. (2003). *Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano, modelos y algoritmo*. Reporte técnico.
  - [6] Kittelson & Associates, Inc. (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)*. 3<sup>rd</sup> Edition, Transit Cooperative Research Program. Transportation Research.
  - [7] Fundación CETMO. Ministerio de Fomento. (2006). *Manual de apoyo para la implantación de la gestión de la calidad según norma UNE-EN 13816 en empresas de transporte de viajeros por carretera*. Madrid.
  - [8] Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. (2007). *Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del contrato administrativo especial para la explotación de la estación de autobuses de Aranda de Duero*.
  - [9] Tcrp report 100 (2003). *Transit Capacity and Quality of Service – manual*, 2nd Edition.
  - [10] <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/578/1/ta729.pdf>
  - [11] <http://es.tool-alfa.com/LinkClick.aspx?fileticket=iss6Sj8VNYE%3D&tabid=69&mid=415>
  - [12] <http://diariodelduero.com/agenda/autobuses/>
- (Última actualización: 18/10/2014) (Consulta: 16/02/2015).
- [13] <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/AC652896-A0A5-4148-BE60-F9C785437F81/126181/ObservatorioCostesViajeros20Julio2014.pdf>

(Última actualización: 01/07/2014) (Consulta: 27/02/2015).

[14] <http://www.aimsun.com/wp/>

[15] <http://www.ine.es>

[16] <http://www.taryet.com/web/>

[17] <http://es.scribd.com/doc/229114544/Manual-de-Aimsun-Moyano#scribd>

(Última actualización: 11/06/2014) (Consulta: 25/04/2015)

[18] [http://www.fgcsic.es/lychnos/es\\_es/articulos/optimizacion de redes de transporte](http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/optimizacion%20de%20redes%20de%20transporte)

(Última actualización: 21/10/2014) (Consulta: 20/03/2015).

[19] <http://www.wolfram.com/mathematica/>

[20] <http://www.imf.org/external/>

[21] <http://www.pwc.es/es/publicaciones/economia/assets/la-economia-espanola-en-2033.pdf>

(Última actualización: 08/11/2013) (Consulta: 7/03/2015).

[22] <http://es.slideshare.net/santiagoopn/regresion-lineal-multiple>

(Última actualización: 04/01/2012) (Consulta: 21/02/2015).

[23] <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>

[24] <http://www.archdaily.com/168457/bus-station-of-rio-maior-domitianus-arquitectura-2/imagen2-3/>

(Consulta: 10/05/2015).

[25] <http://www.estaciondeautobusesdepamplona.com/Inicio.aspx>

[26] <https://es.pinterest.com/pin/135952482473304726/>

(Consulta: 10/05/2015).

[27] <http://english.dot.gov.taipei/ct.asp?xItem=56344942&ctNode=67049&mp=117002>

(Consulta: 10/05/2015).

[28] <http://www.autoperiferia.com/darsenas/darsenas.html>



(Consulta: 10/05/2015).

[29][http://www.arquitecturamop.cl/anteproyecto/Documents/Edificio\\_MOP\\_VAL\\_PO/estandares%20de%20Dimensionamiento%20MOP.pdf](http://www.arquitecturamop.cl/anteproyecto/Documents/Edificio_MOP_VAL_PO/estandares%20de%20Dimensionamiento%20MOP.pdf)

(Consulta: 10/05/2015).

## **9 ANEXO 1: PLANOS**